

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Международная научно-техническая конференция
**«Полимерные композиты
и трибология»**,
посвящается 100-летию со дня рождения
академика В.А. Белого

International Scientific and Technical Conference
**«Polymer Composites
and Tribology»**,
dedicated 100th anniversary of the academician
V.A. Belyi birthday

Гомель, 28-30 июня 2022 г.

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований
Научно-технический совет при Гомельском облисполкоме
Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ИММС НАН Беларуси)»
Концерн «Белнефтехим»

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)

Гомель • Беларусь
28—30 июня 2022 г.
Тезисы докладов



ГОМЕЛЬ • 2022

УДК 620.22-419:678.01-621.891

ПОЛИКОМТРИБ-2022: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. — 188 с.

ISBN 978-985-6477-57-0

В сборнике представлены тезисы докладов участников международной научно-технической конференции «**Полимерные композиты и трибология**», посвященные 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, В.Л. Басинюк, Ф.М. Бородич, В.М. Бузник, Ванг Сиаофенг, П.А. Витязь, И.Г. Горячева, А.М. Гулиев, А.Х. Джанахмедов, В.Г. Залесский, С.М. Захаров, С.Н. Каюшников, В.В. Коврига, В.И. Колесников, Ю.М. Кривогуз, В. Левченко, Луо Жианбин, Ю.М. Лужнов, С.С. Негматов, А.А. Охлопкова, С.В. Панин, О.П. Паренаго, Н.Р. Прокопчук, А.А. Рогачев, А.В. Рогачев, А.И. Свириденко, Е.В. Шалобаев, В.М. Шаповалов

Подписано в печать 27.06.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 70 экз. Заказ № 08-22

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., Ковалёва И.Н., 2022

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	i
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	3
Творческое наследие В.А. Белого, к 100-летию со дня рождения А.Я. Григорьев, Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц.....	5
Цели устойчивого развития и трибология полимеров Н.К. Мышкин, А.Я. Григорьев	6
Проблемы, практика и перспективы компьютерного конструирования новых композиционных материалов С.В. Панин, С.В. Шилько, Б.А. Люкшин	7
Development Tendencies of Improvement of Coatings for the Cutting Tool Today in the World P. Ying, L. Changhong, M. Huang, J. Wu, Z. Ping, T. Yang, and V. Levchenko	8
Экологически безопасные биоразлагаемые смазочные материалы на основе смешанной дисперсионной среды В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник.....	9
Развитие ассортимента труб, предназначенных для гидротранспорта взвеси с различным расчётным ресурсом износостойкости В.В. Коврига	10
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	11
Секция 1 Структура и свойства композиционных материалов	11
Упрочнение ПАБ и его композитов с монтмориллонитом добавками малеинизированного низкомолекулярного полибутадиенового каучука В.Н. Адерица, В.Н. Коваль, В.А. Шаповалов.....	13
Структура и свойства электропроводящих пленок на основе полиимида Р-ОДФО и графена для тканевой инженерии А.М. Камалов, Е.М. Иванькова, Е.Н. Попова, А.Л. Диденко, И.П. Добровольская, К.А. Колбе, М.Э. Борисова, В.Е. Юдин	14
Анализ основных механических свойств пластиковых лыж, изготовленных с применением разработанных композиционных материалов Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич.....	15
Получение материалов с заданными свойствами и минимальным количеством ингредиентов А.Н. Буркин, А.Н. Радюк, Ю.В. Дойлин, В.М. Шаповалов, С.В. Зотов, А.А. Тимофеев.....	16
Разработка новых динамических нанокompозитных ПВС-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ /ПАН мембран для дегидратации этанола Е.С. Бурть, Т.В. Плиско, В.Г. Прозорович, А.И. Иванец, А.В. Бильдюкевич	17
Разработка динамических мембран ПВС/ПАН для первапорации Е.С. Бурть, Т.В. Плиско, Г. Ли, И. Куява, В. Куявский, А.В. Бильдюкевич	18
Огнезащищенные металлсодержащие композитные пасты для нанесения на текстильные материалы А.Н. Назарович, О.В. Рева, А.В. Врублевский	19
Анализ упруго-диссипативных свойств шинных резин методом динамического контактного индентирования А.П. Сазанков, С.В. Шилько, Т.В. Дробыш, Е.М. Петроковец	20

Модель и результаты прогнозирования термомеханических характеристик металло-алмазных композитов с учетом барьерного эффекта на границе раздела С.В. Шилько, Д.А. Черноус.....	21
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ.....	23
Секция 2 Технологии и применение полимерных и композиционных материалов	23
Ультразвуковая сварка биоразлагаемых упаковочных материалов на целлюлозной основе с биополимерным покрытием В.Ф. Луцко, В.В. Рубаник, Д.Д. Гриншпан, С.Е. Макаревич, Т.А. Савицкая	25
Фильтрационные и антибактериальные свойства модифицированных нетканых материалов на основе полипропилена Е.В. Авдеева, Е.Е. Шумская, А.В. Петкевич, Н.В. Дудчик, А.Д. Олейник, А.М. Михалко, Х.Э. Юнусов, А.А. Рогачев, В.Е. Агабеков.....	26
Формирование гидрофобных покрытий на основе гексадецилтриметоксисилана В.М. Акулова, А.Е. Соломянский, Г.Б. Мельникова, И.Г. Чишанков.....	27
Пластическое разрушение полиэтиленовых труб с большими сроками эксплуатации В.Г. Колбая, А.В. Кузнецов, Д.А. Черников, В.В. Коврига	28
Лазерная абляция допированного политетрафторэтилена Е.М. Толстомятов, Л.А. Калинин, Л.Ф. Иванов, В.Ю. Шумская.....	29
Удельная поверхность волокнисто-пористого фторопласта «Грифтекс» П.Н. Гракович, Я.А. Ковалёва, Т.Ф. Кузнецова	30
Мониторинг полимеризации эпоксидной смолы оптико-акустическим методом В.В. Кожушко, В.П. Сергиенко, А.Я. Григорьев.....	31
Результаты стендовых испытаний трубных сталей насосно-компрессорных труб с содержанием хрома 1%, 3% и 5% на установке, моделирующей условия эксплуатации добывающих скважин Ю.И. Попкова.....	32
Формирование гидрогелей в водных растворах карбоксилированного полиакриламида с ионами Cu(II) Д.Л. Кудрявский, Е.К. Фомина, И.Н. Попенкова, И.А. Климовцова, Е.В. Гринюк	33
Радиационно-индуцированные изменения упругих свойств липопротеинов крови крыс И.А. Никитина, И.А. Челнокова, М.Н. Стародубцева	34
Активация композиционного материала на основе полилактида в газовом разряде А.А. Павлов, А.М. Камалов, М.Э. Борисова, К.В. Малафеев, В.Е. Юдин	35
Структура микроволоконного фильтрующего элемента, прошедшего эксплуатацию в фильтре-сепараторе сырого газа В.Ю. Гарбарук, В.А. Гольдаде	36
Разработка градиентных акустических композитов на основе природного сырья для шумовых экранов автомобильных и железных дорог В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.В. Кожушко, А.С. Тулейко, А. Алексиев	37
Химическая металлизация текстильных материалов А.Н. Назарович, О.В. Рева, Я.В. Харак	38
Исследование возможности изготовления плитных материалов на основе отходов древесной промышленности с добавлением отходов кожкартонов К.И. Тарутко, А.Н. Буркин, И.М. Грошев	39
Влияние структуры обувных искусственных кож на эксплуатационные и технологические свойства В.Д. Борозна, А.Н. Буркин, В.А. Гольдаде, С.В. Зотов, В.Е. Сыцко	40
Магнитно-абразивные композиционные материалы с полимерным связующим В.Е. Бабич, В.Я. Лебедев, С.В. Якубовская.....	41

Gravimetric Study of Irradiation Effect on Poly-L-Lactide Hydrolysis A.A. Fedorenko, Y.V. Hryniuk, S.V. Kostjuk, and I.A. Sal'nikova	42
Очистка от загрязнений смазочным маслом компримированного CO₂ при производстве карбамида В.Ю. Шумская, П.Н. Гракович, С.Ф. Жандаров	43
Биокомпозиция для модифицирования сосудистых кондуитов Е.А. Цветкова, Е.Ю. Дорошко, Н.С. Винидиктова, И.Ю. Ухарцева, С.В. Зотов	44
Композиционные материалы для защиты металлических поверхностей Е.Ф. Кудина	45
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	46
Секция 3 Трибология.....	46
Влияние добавок биоуглеродов на триботехнические свойства фрикционного материала на основе меди А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, С.А. Янковский	47
Разработка стенда для трибологических испытаний по кинематической схеме «шар-диск» М.В. Прожега, Е.О. Решиков	48
Влияние структуры углеродных алмазоподобных покрытий на их разрушение при трении в режиме граничной смазки И.А. Буяновский, М.М. Хрущов, В.Д. Самусенко, В.А. Левченко	49
Эффективность применения твердосмазочных покрытий в парах трения «металл-полимер» М.И. Прудников	50
О влиянии химического состава стального контртела на скорость изнашивания малонаполненного нанокompозита ПТФЭ-аморфный SiO₂ В.Н. Адериha, В.А. Шаповалов	51
Определение коэффициента трения при поперечной прокатке методом разрезного инструмента С.С. Дубенец	52
Износостойкие высокопрочные чугуны с аустенитно-карбидной металлической матрицей М.С. Ковалько, А.Т. Волочко, Р.Э. Трубицкий	53
Влияние биоразлагаемого смазочного материала на трение Ni-P покрытия в слабонагруженных узлах трения В.Г. Кудрицкий, Д.М. Гуцев	54
Скольжение твердого тела по горизонтальной плоскости с симметричным ортотропным трением и динамически согласованном законе трения Н.Н. Дмитриев, Е.М. Петроковец	55
Триботехнические свойства волокнистой чесальной ленты Т.В. Буевич, Е.С. Максимович, В.Н. Сакевич	56
Триботехнические свойства текстильных материалов при их поверхностной модификации эмульсионными смазками, активированными мощным ультразвуком Т.В. Буевич, Е.С. Максимович, В.Н. Сакевич	57
Исследование коррозионной стойкости плакированных покрытий М.А. Леванцевич, В.Л. Басинюк, С.И. Платов	58
Трибологические свойства в вакууме и при повышенной температуре покрытий из дисульфида молибдена, нанесенных магнетронным напылением М.В. Прожега, Е.О. Решиков	59

Использование антиокислительной присадки к дисперсионной среде из растительного сырья для пластичных смазочных материалов Ф.А. Григорьев, Д.М. Гуцев, И.Н. Ковалёва, Н.К. Мышкин	60
Влияние комплексных оксидов (пыли газоочисток металлургических производств) на фрикционно-износные характеристики полимерных композитов В.К. Меринов	61
Влияние ингибиторов коррозии на фрикционно-износные характеристики композитов и шумообразование при трении В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.В. Кожушко, В.К. Меринов	62
Контактная задача с трением в рамках модели Винклера основания для опоры качения Е.В. Коднянко, Д.А. Черноус	63
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	65
Hybrid Absorbent Design by Gamma Radiation-Induced Grafting of Acrylamide onto Chitosan Е.К. Fomina, D.L. Kudryavsky, I.A. Klimovtsova, Y.V. Hryniuk, and A.A. Fedorenko	66
The Effect of the Intravitreal Administration of Antifungal Drugs on Friction Properties of Rabbit Erythrocyte Surface N.M. Shkliarava, I.A. Chelnokova, S. Karachrysafi, Th. Papamitsou, A. Sioga, A. Komnenou, V. Karampatakis, and M.N. Starodubtseva	67
Прочностные и фильтрующие свойства волокнистых материалов, пластифицированных низкомолекулярными модификаторами Е.В. Авдеева, А.С. Неверов	68
Изучение влияния технологической среды на структуру полипропиленовых пленок А.С. Астапкин, А.С. Рябцев, Н.С. Винидиктова, И.В. Царенко	69
Фрикционные передачи с поверхностно-модифицированными наноструктурированными МДО-покрытиями в тяговых приводах электромобилей В.Л. Басинюк, С.Н. Поддубко, Р.Е. Волкотруб, А.А. Глазунова	70
Использование методов оценки сопротивления раздиру раздирающим элементом для оценки прочности соединений свариваемых поверхностей при получении труб методом спиральной намотки А.С. Васильева, Н.В. Бисерова, В.В. Коврига	71
Экологичные материалы на основе растительного сырья Н.С. Винидиктова	72
Особенности применения синхронного ТГА/ИКС для оценки процесса пиролиза полимерных композитов Е.Н. Волнянко, Е.В. Воробьева, О.А. Макаренко	73
Исследование микрогеометрии рабочей поверхности бандажа колесной пары грузового локомотива методом 3D-сканирования Е.Н. Волнянко, В.Д. Докукин, А.В. Тимошенко	74
Антисептические составы на основе функционализированного терпеноидного сырья Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич	75
Низкотемпературное извлечения летучих фракций углеводородов из нефти и нефтепродуктов Е.С. Глинников, Н.С. Винидиктова, Д.Л. Стасенко	76
Статистический анализ процессов электроконтактного взаимодействия металлов в среде электропроводной смазки Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалёва, Л.Н. Марченко, В.В. Подгорная	77
Подбор схемы трения и материалов для моделирования трения в коленных суставах Ф.А. Григорьев, Д.В. Чарнаштан, П.Ю. Игнатенко, В.И. Николаев	78

Рециклинг резинотехнических отходов	
Р.М. Долинская, Е.Н. Волнянко, Н.Р. Прокопчук	79
Роль молекулярного взаимодействия в композиционных материалах на основе полимеров	
И.И. Злотников, В.М. Шаповалов, И.Н. Ковалёва, Д.Л. Подобед	80
Полимерные композиты для лучевой терапии	
С.В. Зотов, Д.М. Лось, Н.С. Винидиктова, В.М. Шаповалов, Е.А. Цветкова, В.А. Гольдаде, Р.Ю. Славников	81
Влияние технологических факторов на процесс лазерной абляции политетрафторэтилена в вакууме	
Л.Ф. Иванов, Л.А. Калинин, А.З. Скороход	82
Получение гидрогелей на основе привитых сополимеров кукурузного крахмала с акриламидом	
И.А. Климовцова, Е.К. Фомина, Е.В. Гринюк, А.А. Федоренко, Д.Л. Кудрявский	83
Воздействие трения на ресурс пластичности металла при поперечно-клиновой прокатке	
Г.В. Кожевникова	84
Зависимость напряжённого состояния при продольной прокатке от контактного трения	
Г.В. Кожевникова, С.С. Дубенец, В.Я. Щукин	85
Биоутилизируемые композиционные материалы на основе растительного сырья	
О.В. Конакова, Н.С. Винидиктова, В.М. Шаповалов, С.В. Зотов	86
Композиционные материалы полимер–диоксид кремния	
П.А. Костюкевич, А.М. Кузей, В.Я. Лебедев, А.В. Францкевич	87
Влияние концентрации наполнителя на структуру связующего на основе фенол-формальдегидной смолы	
П.А. Костюкевич, Ж.Е. Макарова, А.В. Францкевич	88
Использование реактопластов в качестве изоляции элементов высоковольтного электрооборудования	
Е.Ф. Кудина, И.В. Приходько, П.А. Курицын	89
Исследование противозадирных свойств материалов покрытий	
М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, Е.В. Пилипчук	90
Разработка комплекса методов оценки свойств фторопластовых покрытий оснастки пултрудеров на основе различных видов фторполимеров	
К.А. Лобанов, А.С. Васильева, В.В. Коврига	91
Влияние ультразвуковой обработки технического углерода на механические и электрофизические свойства полиамида 6	
Н.А. Марусенко, С.П. Богданович, Ю. Се	92
Древесно-полимерные композиты на основе термопластичных отходов для профильно-погонажных изделий	
К.В. Овчинников, С.Ф. Мельников, А.В. Шаповалов, Д.Л. Подобед, С.Н. Бобрышева	93
К выбору размера частиц полидисперсного бентонита во вторичной полимерной матрице	
Д.Л. Подобед, В.Н. Пасовец, К.В. Овчинников	94
Исследования антифрикционных покрытий дисульфида молибдена в экстремальных условиях эксплуатации	
М.В. Прожега, Е.О. Решиков, Е.О. Константинов	95
Использование одностенных углеродных нанотрубок для получения токопроводящих фторсодержащих полимеров	
В.П. Селькин, О.С. Стерехов	96
Влияние ингибиторов коррозии на фрикционно-износные характеристики композитов и шумообразование при трении	
В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.В. Кожушко, В.К. Меринов	97

Влияние обработки в низкотемпературной плазме остаточных газов на поверхностную энергию сополимера метилметакрилат-акрилонитрил-бутадиен-стирола В.А. Стратанович, А.С. Брундуков, С.Ф. Жандаров, В.М. Макаренко.....	98
Износостойкость угле- и стеклонаполненных композиционных материалов на основе полиэфирэфиректона при трении в присутствии незакрепленного абразива В.А. Стратанович, А.С. Брундуков, А.В. Шаповалов, И.С. Шилько.....	99
Композиционные материалы на основе отходов полиуретанов, модифицированных дисперсными наполнителями А.А. Тимофеев.....	100
Влияние характеристик процесса плазменной полимеризации октафторциклобутана на эффективность осаждения покрытий Е.М. Толстопятов, В.А. Шелестова, В.М. Макаренко.....	101
Воздействие различных видов топлива на минимальное разрушающее давление в полимерных трубках В.Н. Усова, С.А. Герасименко	102
Бактерицидный криогель Е.А. Цветкова, И.Ю. Ухарцева, В.И. Сильвистрович, Ж.В. Кадолич	103
Композиционные материалы на основе вторичных термопластов и дисперсных наполнителей В.М. Шаповалов, В.Д. Джафаров, А.А. Тимофеев, Д.Л. Подобед, С.В. Зотов	104
Экологические аспекты полимерных композитов В.М. Шаповалов, А.Я. Григорьев.....	105
Влияние антипирирующих добавок на динамические механические свойства и стойкость к окислению термопластичного полиуретана В.В. Шевченко, А.А. Давыдов, С.П. Богданович, Ф. Цай.....	106
Исследование триботехнических характеристик газопламенных порошковых покрытий В.К. Шелег, М.М. Шодиев, М.А. Леванцевич.....	107
Влияние добавки полиакриловой кислоты в осадительную ванну на транспортные свойства мембран для ультра- и нанофильтрации С.С. Шиканов, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич	108
Изучение влияния комбинированного модифицированного углеволокнистого наполнителя на свойства антифрикционных ПТФЭ композитов И.С. Шилько	109
Особенности механических свойств при сжатии конструкционно-антифрикционных тканых композитов для высоконагруженных узлов трения С.В. Шилько, Т.В. Дробыш, А.П. Сазанков	110
ЗАОЧНЫЕ ДОКЛАДЫ	111
Swelling of Biodegradable Glucomannan and Zein Film Composites I.B. Ismoilov, Z.K. Muhidinov, and Kh.M. Abdullaev	113
Synthesis and Characterization of Alginate-Capped Silver Nanoparticles V.V. Nikalaichuk, K.S. Hileuskaya, V.I. Kulikouskaya, A.I. Ladutska, A.V. Sidarenka, and K.M. Grigoryan	114
Formation of Emulsion Macrocapsules Based on Protein Sericin and Apple Pectin Z.U. Sherova, S.R. Usmanova, A.S. Dzhonmurodov, and Z.K. Muhidinov.....	115
The Process of Obtaining Polyacrylamide-Based Copolymers Via Frontal Copolymerization in Continuous Mode M.B. Shuliakouskaya, N.V. Zakharevich, and Y.V. Hryniuk	116
Plastic Lubricants Optimized by Carbon Nanostructures N.V. Usol'tseva, A.S. Parfenov, M.A. Shilov, D.N. Stolbov, A.I. Smirnova, and S.V. Savilov	117

Методы реализации концепта энергетического и технологического соответствия компонентов в технологии высоконаполненных композитов	
С.В. Авдейчик, А.Н. Лесун, В.А. Струк, А.С. Антонов	118
Формирование наночастиц в водной среде из мишеней полупроводников и металлов	
А.Г. Анисович, М.И. Маркевич, В.Л. Журавлева	119
Механизмы многоуровневого модифицирования полиамидных матриц с применением диффузионных технологий	
А.С. Антонов, В.А. Струк, Д.В. Нахвват, П.В. Ключко, Н.Р. Прокопчук	120
К проблеме утилизации отходов полимеров в Беларуси	
А.Л. Антонова, В.Е. Сыцко, В.М. Шаповалов, С.В. Зотов	121
Биоразлагаемые пленки на основе хитозана и поливинилового спирта с наноразмерными частицами серебра, стабилизированными экстрактами <i>Dimocarpus longan</i>	
Т.А. Безносик, Т.А. Савицкая, И.М. Кимленко, Ле Тхи Ми Хань, Д.Д. Гриншпан	122
Морфология и механические свойства TiAlN/C покрытий	
А.Г. Бердиев, Н.Н. Федосенко	123
Влияние условий формования на структуру и транспортные свойства полуволоконных мембран на основе полисульфона	
А.В. Бильдюкевич, Т.А. Глевицкая, Е.С. Любимова, Е.А. Назаров, Т.В. Плиско	124
Спектральные проявления формирования структуры полимерной матрицы полиуретанового композита с борной кислотой и с диоксибензолами	
Е.Ю. Бобкова, Л.Н. Василевская, О.О. Гавриленко, Н.А. Шкредова	125
Влияние природы связующего и вспенивающей системы на физико-химические свойства и горючесть полимерных термовспениваемых композиционных материалов	
В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.Б. Перевозникова	126
Триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ и термообработанного ПТФЭ	
А.П. Васильев, С.Н. Данилова, А.А. Дьяконов, А.А. Охлопкова	127
Особенности сорбции и концентрирования пенополиуретановым композитом микрокомпонентов металлов из водных сред	
В.С. Васильева, Л.Н. Василевская, М.А. Ксенофонов, В.В. Понарядов, Н.А. Шкредова	128
Закономерности процессов межмолекулярного взаимодействия высокореакционных полиуретановых смесей с наноразмерными добавками	
В.С. Васильева, С.В. Выдумчик, М.А. Ксенофонов, Т.Г. Павлюкевич, В.В. Понарядов	129
Экструзируемый антифрикционный композит на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена	
О.В. Гоголева, П.Н. Петрова, А.Л. Федоров, М.Н. Кондаков	130
Электрокинетические явления в приповерхностных слоях пар трения	
А.Х. Джанахмедов, М.Я. Джавадов	131
Влияние содержания наполнителей на свойства полимерных композиций	
В.Д. Джафаров, М.А. Манафов, С.А. Бекташи, Г.Г. Мусаева, М.Д. Раджабова, С.М. Халилова	132
Влияние условий эксплуатации на трение и износ полимерных композитов	
А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян	133
Использование модифицированной целлюлозы для получения коллоидных систем на основе диоксида кремния	
И.М. Кимленко, Р.Р. Мохаммад, М.Б. Новицкая, Н.А. Мелеховец, Я.А. Косенок, В.Е. Гайшун	134
Объемная плотность энергии деформации в полимерных фрикционных композитах	
В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, И.В. Лавров, А.П. Сычев, А.А. Сычев, В.Б. Яковлев	135

Структура и триботехнические свойства покрытия $ZnAl_3O_8$, сформированного центробежной индукционной наплавкой	
А.И. Комаров, Д.В. Орда, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок.....	136
Адгезионная прочность композиционного $Al_2O_3-ZrO_2$ покрытия, полученного микродуговым окислением предварительно нанесенного металлокерамического слоя	
А.И. Комаров, А.С. Романюк.....	137
Прогнозирование износостойкости эластомеров для использования в газотранспортном оборудовании	
В.Г. Копченков, Е.А. Чеботарев, В.С. Мякишев	138
Влияние содержания кремния в хромистом чугуна на стойкость деталей дробильно-размольного оборудования	
Г.П. Короткин, А.Г. Анисович, П.Ю. Дувалов	139
Эксплуатационные характеристики огнестойких полиамидных материалов	
Д.В. Криваль, О.В. Рева	140
Физико-механические свойства светоотражающих композитных материалов на текстильной основе	
Д.В. Криваль, О.В. Рева, В.В. Коваль	141
Применение высокоэнергетических методов обработки для повышения износостойкости конструкционных материалов	
Л.И. Куксенова, Д.А. Козлов	142
Электронно-лучевое нанесение покрытий на основе лигнина и кварцетина, структура и антибактериальные свойства	
Лю Имин, А.А. Рогачев, А.В. Рогачев, И.И. Концевая, С.А. Фролов, М.А. Ярмоленко.....	143
Термодинамический анализ процесса никотрирования стали 25Х3М3НБЦА	
П.И. Маленко, А.Ю. Леонов, К.Д. Релмасира.....	144
Стабильность свойств волокнистых катионитов ФИБАН	
Г.В. Медяк, А.А. Шункевич, А.А. Поликарпов, В.Ж. Ворса	145
Влияние Фаялита на трибологические свойства фрикционных безасбестовых полимерных материалов	
Н.Г. Меликсетян, Г.О. Асчян	146
Термомеханические свойства Ленгмюра-Блоджетт пленок полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния	
Г.Б. Мельникова, Т.Н. Толстая, Д.В. Сапсальёв, А.С. Петровская, С.А. Чижик.....	147
Исследование воздействия ультрафиолетового излучения на защитные покрытия зарядочувствительным методом	
В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин.....	148
Реализация расчета износа зубьев зубчатых колес с учетом их конструкционных параметров	
В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, С.В. Киргинцева, М.В. Москалева	149
Исследование влияния параметров униполярного импульсного питания на разрядные характеристики магнетронной распылительной системы	
Р.И. Нестерчик, С.М. Завадский, Х.Т. Доан.....	150
Композиты на основе сополимеров полианилина с о-анилидином и анилин-2-сульфокислотой, допированные наночастицами оксида никеля	
Х.А. Новик, Л.Н. Филиппович, Ж.В. Игнатович, С.Н. Шахаб, В.Е. Агабеков	151
Износостойкие полимерные композиционные материалы	
А.А. Охлопкова, Н.Н. Лазарева, Р.В. Борисова, Т.А. Охлопкова, П.Н. Тарасова	152
Кинетика промокания водозащитных композиционных материалов различных структур	
Д.К. Панкевич, В.Г. Кудрицкий.....	153
Модель транспорта углеродных наночастиц в условиях абразивного изнашивания	
А.С. Парфенов, А.В. Волков, Е.В. Березина, В.А. Годлевский	154

Механические свойства композиционных покрытий на основе водорастворимых полимеров и наночастиц оксида алюминия	
А.С. Петровская, Д.Л. Радюкевич, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик	155
Оценка изменения взаимодействия на границе «минеральный материал – связующее» после обработки поверхности составом гидрофобным профилактическим	
В.В. Петрусевиц	156
Климатические испытания стабилизированного полиэтилена марки 273-83	
Е.С. Петухова, А.Л. Федоров, А.Г. Аргунова	157
Структура а-С покрытий, осажденных из сепарированных потоков углеродной плазмы	
Д.Г. Пилипцов, А.С. Руденков, А.В. Рогачев, С.Ю. Чепкасов	158
Методика формирования и особенности морфологии планарно-структурированных углеродных покрытий	
А.С. Руденков, А.А. Середа	159
Структура и свойства композиционных пленок на основе желатина с неорганическими наночастицами	
Д.В. Сапсальёв, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик	160
Композиты фумарата циркония и полиэлектролитов с улучшенными адсорбционными характеристиками и механической прочностью	
Д.Ю. Сахаревич, В.В. Паньков, Т.Г. Шутова	161
Влияние параметров разряда на структуру и свойства АПП	
К.А. Саховский, Д.Г. Пилипцов, А.Н. Попов	162
Влияние структуры диамина на транспортные свойства мембран на основе полиэфиримидов в процессе дегидратации изопропанола методом первапорации	
А.Е. Солдатова, Т.В. Плиско, А.М. Орлова, А.А. Кузнецов, Е.С. Бурть, А.В. Бильдюкевич	163
Механизмы направленного структурообразования имидосодержащих фторкомпозитов	
В.А. Струк, Э.Т. Крутько, А.С. Антонов, А.Н. Лесун	164
Бесфторный синтез MII-101(Cr) для получения композитов	
А.С. Тимоненкова, Т.Г. Шутова	165
Синтез тримезилата меди для селективной адсорбции газов	
М.П. Флягина, А.С. Тимоненкова, В.В. Паньков	166
Покрытия вольфрама и молибдена с алмазоподобным углеродом, полученные магнетронным распылением – структурно-фазовое состояние и трибологические свойства	
М.М. Хрущов, Д.А. Суляндзга, В.М. Авдюхина, И.С. Левин, В.Д. Самусенко	167
Синтез и свойства производных хитозана и глюкозы	
Е.О. Чекановская, А.Н. Красковский, Е.И. Ладутько, К.С. Гилевская	168
Ультратонкие пленки на основе нанокомпозитов полисахарид-Ag	
Е.О. Чекановская, В.В. Николайчук, А.Н. Красковский, К.С. Гилевская, С.В. Пинчук, Е.А. Степанова, В.И. Куликовская	169
Влияние рентгеновского излучения на механические свойства экзосом крови крыс	
И.А. Челнокова, М.Н. Стародубцева, И.А. Никитина, Н.И. Егоренков	170
Механические и оптические свойства фуллеренсодержащих пленок полистирола и полиэтилена высокого давления	
Э.М. Шпилевский, С.А. Филатов	171
Фронтальная полимеризация акриламида в водных растворах в полидиметилсилоксановых трубчатых реакторах	
М.Б. Шуляковская, В.Д. Левкович, Е.В. Гринюк	172
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	173

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)

28—30 июня 2022 г., Гомель, Беларусь

ТВОРЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ В.А. БЕЛОГО, К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

А.Я. Григорьев, Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А.Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

В докладе освещается творческий путь в науке доктора технических наук, профессора, академика Владимира Алексеевича Белого, «Заслуженного изобретателя БССР», «Заслуженного деятеля науки и техники БССР», автора научного открытия, основателя и первого директора Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси. Показана выдающаяся роль ученого с мировым именем в образовании, становлении и развитии первой на Гомельщине академической организации, влияние на развитие науки и высшего образования в Беларуси.

Рассмотрены этапы формирования В.А. Белым нового в Беларуси научного направления и научной школы в области физики, механики, материаловедения металлополимерных систем и трибологии. Приведены материалы, касающиеся научного наследия В.А. Белого, достижений его научной школы в данной области.

В начале научной деятельности В.А. Белый с учениками изучал контактную усталость, трение и износ конструкционных полимерных материалов применительно к конструкциям зубчатых и цепных передач [1]. Установлено, что комплекс физико-механических характеристик полимеров во многом обуславливается характером их надмолекулярного строения. Разработаны методы упорядочения надмолекулярных структур полимеров введением искусственных зародышей структурообразования для улучшения и стабилизации прочностных и деформационных характеристик полимеров и конструкций.

В области тонкослойных полимерных покрытий изучено влияние реологических и структурных характеристик полимеров на их физико-механические свойства, установлены оптимальные режимы нанесения для ряда термопластичных полимеров [2]. Были разработаны эффективные древесно-полимерные композиты для многих отраслей промышленности [3], технологии получения фильтрующих полимерных материалов.

В области трения и изнашивания полимерных материалов. В. А. Белым с учениками получены оригинальные результаты при исследовании взаимосвязи надмолекулярного строения и фрикционных свойств, механохимических явлений и природы адгезии металлополимерного фрикционного контакта, реологии и фактической площади касания [4, 5]. Создан широкий класс новых металлополимерных материалов, покрытий и конструкций, всесторонняя апробация которых в машиностроении показала их высокую эффективность. Разработаны теоретические основы создания смазок с добавками мономеров

для металлополимерных узлов трения, реализующие трибохимические реакции полимеризации на поверхностях трения. Получены новые данные о свойствах смазок в граничных слоях, разработаны эффективные смазочные составы для снижения потерь на трение и износ в электрических контактах. Эти результаты нашли отражение в известных монографиях В.А. Белого и его учеников, которые были изданы и за рубежом [5—7].

В работах В. Белого получила развитие механика фрикционного контакта твердых тел с учетом микро- и нанощероховатостей, исследованы реологические свойства взаимодействующих материалов с использованием методик компьютерного анализа поверхности на основе сканирующей зондовой и растровой микроскопии. Созданы научные приборы, обеспечивающие комплексность исследования вязкопластических, теплофизических и деформационных процессов, кинетики и закономерностей структурообразования полимерных композитов и моделирование условий их переработки в изделия. Разработаны высокоточные приборы для измерения на наноуровне параметров трения и адгезии в высокоточных контактах прецизионных поверхностей, работающих в космических условиях; методы и приборы трибодиагностики машин. Диагностика трибосистем в реальном времени успешно реализована методами акустической эмиссии и электрофизической трибоскопии.

Результаты фундаментальных и прикладных исследований представителей школы обобщены в более чем 140 монографиях, 200 докторских и кандидатских диссертациях, разработки защищены более 2400 авторскими свидетельствами на изобретения и патентами.

1. Белый, В.А. Зубчатые передачи из пластмасс / В.А. Белый, А.И. Свириденко, С.В. Щербаков. — Минск: Наука и техника, 1965. — 248 с
2. Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. — Минск: Наука и техника, 1976. — 416 с.
3. Белый, В.А. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия / В.А. Белый, В.И. Врублевская, Б.И. Купчинов. — Минск: Наука и техника, 1980. — 280 с.
4. Белый, В.А. Адгезия полимеров к металлам / В.А. Белый, Н.И. Егоренков, Ю.М. Плещакчевский. — Минск: Наука и техника, 1971. — 286 с.
5. Трение полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. — М.: Наука, 1972. — 204 с.
6. Friction and Wear in Polymer-Based Materials / V.A. Bely, A.I. Sviridenok, M.I. Petrokovets, and V.G. Savkin. — Oxford [et al.]: Pergamon Press, 1982. — 426 p.
7. Tribology in the USA and the Former Soviet Union: Studies and Applications / eds.: V.A. Belyi, K.C. Ludema, N.K. Myshkin. — New York: Allerton Press, 1994. — 455 p.

ЦЕЛИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ И ТРИБОЛОГИЯ ПОЛИМЕРОВ

Н.К. Мышкин*, А.Я. Григорьев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, nkmyshkin@mpri.org.by

Введение. Концепция устойчивого развития рассматривается как совокупность 17 целей, разработанных в 2015 году Генассамблеей ООН. Трибология стала одним из факторов достижения этих целей в области промышленности и инноваций (цель SDG9) [1, 2].

В целом потери, связанные с трением и износом машин, для промышленно развитых стран оценивают в 3—5% валового национального продукта, а из потребляемой промышленностью энергии около четверти расходуется на преодоление сил трения. Снижение потерь на трение, уменьшение износа машин, снижение выбросов двигателей, применение экологически-чистых смазок — лишь небольшой перечень возможностей трибологии для достижения целей устойчивого развития [2]. Приложения трибологии вышли далеко за рамки техники, и особую роль в жизни общества в последние годы стала играть так называемая “зеленая трибология”.

Цель исследований. Рассмотреть реализацию актуальных направлений экологически эффективной (зеленой) трибологии в разработке полимерных композитов и смазок для снижения потерь материалов и энергии в узлах трения машин и механизмов при минимальном вреде для окружающей среды.

Полимерные композиты. В начале нынешнего века практически незамеченным никем, кроме специалистов, произошло одно важное событие — мировой объем годового выпуска полимерных материалов в метрах кубических превысил годовой объем выпуска металлов.

Замена металлов на полимерные композиты является эффективным путем снижения потерь энергии и материалов при трении, позволяющая резко снизить массу машин и механизмов, а, следовательно, контактные нагрузки в узлах трения, износ и вредные выбросы. Стойкость к коррозии и низкий коэффициент трения полимеров, а также возможность введения в них различных функциональных добавок обеспечивают им постоянное расширение их сфер применения. Полимерные композиты благодаря своей многофункциональности стали областью интенсивных исследований и разработок, в особенности с появлением таких перспективных материалов как полисульфоны и полиэфирэфиркетоны [3].

При концентрациях нанодобавок в десятые доли процента их площадь поверхности огромна, а влияние распространяется на весь объем материала. Основа переходит в состояние граничного слоя, ко-

торому нанодобавки придают заданные свойства.

Большой интерес привлекают полимер-силикатные нанокompозиты, имеющие относительно низкую стоимость, так как сырье для них имеется в природных месторождениях глин [2, 3]. Несмотря на высокую стоимость используются и нанокуглеродные добавки, а открытие графена стимулировало новую волну исследований в данной области.

Смазочные материалы. До наступления XX-го века растительные и животные жиры были очень распространенными смазочными материалами. Развитие нефтепереработки и исследования в области химии присадок привели к вытеснению природных жиров и масел минеральными смазочными материалами. В конце прошлого века по требованиям экологов начались ограничения применения минеральных масел в сельском и лесном хозяйстве. Появились директивы ЕЭС [4] по стимуляции использования растительных масел и сейчас более 150 марок смазочных масел и рабочих жидкостей производятся из растительного сырья. Показано, что растительные масла по многим показателям не уступают минеральным [2, 5]. Они проявляют хорошие противоизносные и защитные свойства благодаря образованию трибополимерных пленок [5]. Имеется также и стимулируемая экологическими причинами тенденция к получению полимеров технического назначения из растительного, а не минерального сырья.

Выводы. Зеленая трибология в настоящее время оказывает важное влияние на достижение целей устойчивого развития в различных областях и можно с оптимизмом смотреть на ее достижения в использовании полимерных и смазочных материалов. При этом основными направлениями исследований и разработок могут стать полимерные композиты и смазочные материалы на основе биоразлагаемого сырья.

1. P. Jost: Brief notes. In: Int. conference “50th anniversary of the “Jost report”, pp. 1—2. IMech, London, (2016).
2. N.K. Myshkin, F.A. Grigoriev. Green tribology for Sustainable Development Goals // Proceedings of I4SDG IFToMM Workshop, ed. by G. Quaglia, Springer, 2022. — pp. 421–428.
3. Н. К. Мышкин. Характеристики нанокompозитов на основе ПЭЭК при трении по стали / Н. К. Мышкин, G. Zhang, Д.М. Гуцев, Ф.А. Григорьев, W. Wang, G. Li // Трение и износ. — 2021. — Т. 42, № 3. — С. 350–357.
4. K. Brown. The Green Way to Lubricate // Renewable Energy. — 2004
5. N.K. Myshkin, A.Ya. Grigoriev, I.N. Kavaliova. Influence of Composition of Plant Oils on Their Tribological Properties // Tribology in Industry. — 2017. — Vol. 39, No. 2. — P. 207–210 DOI: 10.24874/ti.2017.39.02.07

ПРОБЛЕМЫ, ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.В. Панин^{1,2}, С.В. Шилько³, Б.А. Люкшин¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; svp@ispms.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. Наряду с традиционными, преимущественно экспериментальными, методами получения новых материалов с заданными свойствами, активно развивается концепция компьютерного дизайна (конструирования) полимерных, металлических и керамических композитов.

Композиционные материалы по определению являются гетерогенными и в большинстве случаев иерархичными системами, что значительно усложняет решение вышеназванной амбициозной задачи. Тем не менее, выделение и формализация структурных уровней методами физической мезомеханики материалов позволяет достаточно быстро находить оптимальные рецептуры (объемные соотношения базовых компонентов) и сочетания их физико-механических характеристик [1]. Так, армирующие включения определяют верхний масштаб гетерогенности; на уровне кристаллитов рассматривается неоднородность полимерной матрицы; еще более тонкую детализацию подразумевает анализ межфазного слоя «матрица-наполнитель».

На первом этапе решается прямая задача прогнозирования эффективных характеристик композита с использованием вариационных принципов и методов осреднения по представительному объему [2]. После этого решается более сложная обратная задача выбора структуры материала в пространстве управляющих параметров с учетом односторонних или двусторонних ограничений.

Целью работы является применение методов компьютерного конструирования для создания высоконагруженных узлов трения из антифрикционных композитов на основе высокоэффективных полимеров (High-Performance Polymers), способных длительное время работать при высоких температурах.

Материалы и методы. Исследовались композиты на основе полиэфирэфиркетона, полиимида, полиэфиримида, алюминия и оксида алюминия. В качестве упрочняющего наполнителя использованы углеродные ПАН-волокна различной размерности и стеклянные микросферы. Твердосмазочными включениями выступали политетрафторэтилен, графит, дисульфид молибдена.

Результаты и их обсуждение. Предложены и верифицированы микромеханические модели дисперсно- и направленно-армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ), учитывающие физическую нелинейность высокомолекулярной матрицы, форму и ориентацию включений, а также

параметры межфазного слоя. Разработан и апробирован алгоритм прогнозирования параметров многокомпонентных ПКМ, обеспечивающих требуемые эффективные характеристики при минимальном объеме экспериментальных данных структурного анализа, механических и трибоиспытаний.

С применением развитой методологии проведения экспериментальных и теоретических исследований деформирования, трения и разрушения различных видов конструкционных и антифрикционных композитов, включая дисперсно-наполненные [1], волокноно-армированные [3]; многослойные, формируемые методом УЗ-сварки; сегментированные, получаемые посредством 3D-печати; наполненные микросферами (инфильтрационное прессование) [4]; высокотеплопроводящие материалы с модифицированным межфазным слоем. В частности, полученные результаты нашли применение для оптимизации состава и контроля состояния ПКМ на основе полиэфирэфиркетона и полифениленсульфида [5].

Заключение. В качестве дальнейшего направления исследований обсуждается многоуровневое оптимальное структурирование конструкционных и функциональных композитов на основе высокоэффективных полимеров, в том числе с активными (сенсорными и актуаторными) компонентами.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ (проекты № 20-58-00032 (T20P-223), T21KI-032).

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин, С.В. Шилько, С.В. Панин и др. – Новосибирск, Изд.-во СО РАН, 2017. – 311 с.
2. 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. Мех. комп. матер. 2018, Т. 54, № 6. С. 1-18.
3. 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, с. 162-171.
4. Shil'ko S.V., Chernous D.A., Zhang Q., Lin Y., Choe H. Uniaxial Compression Model for a Metal-Matrix/Hollow-Microsphere Composite Synthesized by Pressure Infiltration // Mechanics of Materials, 2020, Vol. 144, P. 103349 (7 p.).
5. 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, 524.

DEVELOPMENT TENDENCIES OF IMPROVEMENT OF COATINGS FOR THE CUTTING TOOL TODAY IN THE WORLD

P. Ying, L. Changhong, M. Huang, J. Wu, Z. Ping, T. Yang, and V. Levchenko

Institute of Advanced Coating and Materials, Taizhou University, Taizhou, China, vladlev@yahoo.com

Purpose. The review of the technologies of synthesis coatings which are widely used today in the world for the cutting tool and also development of trends in their improvement is considered.

Technology and materials. The extensive application of cutting tools coating promotes the development of physical vapour deposition (PVD) and chemical vapour deposition (CVD) coating technology. Reviewing the development of cutting tools coating technology in the world, we need to master and use the advanced coating technology, improving the mechanical properties, solving the failure problem, and extending the service life of the cutting tools. The demand and the great potential to achieve this purpose for innovative coating materials will also continue to exist in the future, by adjusting the chemical composition and coating architecture, coating on cutting tools with high-performance coating. In addition, a single coating technology obviously cannot meet the requirements of mechanical properties of comprehensive tools, cannot be accepted by the market [1–6]. Table 1 shows the evolution of hard coating materials for cutting tools from 1970 to 2022.

Table 1. Evolution of coating materials for cutting tools [1]

Year	Deposition method	Coating materials
1970	CVD	TiC; TiC/TiCN/TiN; TiC/Al ₂ O ₃ /TiN;
1980	PVD	TiN;
	CVD	TiC/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN;
	MT CVD	TiC/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN;
1990	PVD	TiCN; TiAlN;
2000	CVD	DLC
	PVD	TiN/TiAlN/TiN/TiAlN; TiB; TiN/TiCN; MoS ₂ ; TiAlN/WC-C; CrAlN/ TiAlN, AlTiN; AlCrN, Al ₂ O ₃ ; AlCrSiN;
2010	PVD	TiAlN+, Y, Nb, Hf, Cr, Si, Zr, B, V...
2022	PVD	cBN; CN; TiAlSiN;
	CVD	cBN; CN;
	PVD	Cr/CrN/(Cr,N)-DLC/DLC Cr/Cr-DLC/DLC;
	PVD+CVD	DLC/TiN/Ti/Cu/Ni;

MT CVD: Moderate temperature of chemical vapour deposition.

Result and discussion. Different hybrid systems already exist in the market and are used to create some dedicated coatings as described below. The deposition of low-friction diamond like carbon (DLC) layers requires an intermediary sublayer to attain adhesion. The sublayer is generally created by a PVD process followed by the functional and high-quality tribological DLC top layer created by a plasma-assisted CVD process (PACVD). Cathode arc evaporation (CAE) can also be combined with a sputtering process when a high-performance layer has to combine nonconductive or

semiconductive materials which cannot be evaporated by CAE. Till now, combination of CAE and standard sputtering processes did not lead to significant benefits due to the different characteristics of each process. Nevertheless, the improvement in sputtering due to the development of the “pulsed high-current” process should be the key to combine the advantages of arc and sputtering technologies: high ionization with virtually no droplets to create smooth and dense coatings with optimized coatings structure and properties for cutting tools.

Conclusion. The analysis of development of technological processes of deposition the strengthening coatings which is carried out by us and other authors in the world on the tool showed a steady trend of use of the multilayered and multicomponent nanostructured coatings put of the PVD, CVD methods, and their combinations.

The big variety of the strengthening materials, methods of their deposition on the cutting tool, the processing and analytical equipment for production of coatings and measurement of their characteristics complicates receiving coatings with the reproduced quality indicators. It was one of the reasons for emergence of the international standards regulating structure, structure and properties of the strengthening coatings on the tool.

Thus, it is possible to draw a conclusion that researches of the strengthening coatings on the tool are still relevant around the world.

Acknowledgements. The research was supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant № LTZ20E020001).

1. Levchenko VA., Panfilov Yu.V. The strengthening coatings on the tool. Journal of the strengthening technologies and coatings. - 2020 (5), 234-240
2. Ginting A., Skein R., Cuaca D., Herdianto P., Masyithah Z. The Characteristics of CVD- and PVD-Coated Carbide Tools in Hard Turning of AISI 4340, Measurement. - 2018(129), 548-557
3. Pogrebnjak A D., Webster F. R., Tilley R D., Buranich V.V., Ivashchenko V I., Takeda Y. et. all. Formation of Si Rich Interfaces by Radiation Induced Diffusion and Microsegregation in CrN/ZrN Nanolayer Coating. ACS Applied Materials & Interfaces. - 2021, (13), 16928 -16938
4. Zhang P., Ying P., Lin C., Yang T., Wu J., Huang M., Wang T., Fang Y. and Levchenko V. Effect of Modulation Periods on the Mechanical and Tribological Performance of MoS₂-TiN/MoS₂-TiH Multilayer Coatings. Coatings. - 2021(11), 1230.
5. Dharini T., Kuppusami P., Kumar N., Kumar D., Soman A., et.all. Tribological properties of YSZ and YSZ/Ni-YSZ nanocomposite coatings prepared by electron beam physical vapour deposition, Ceramic International. - 2021(47), 26010–26018.
6. Waldla H., Tkadletz M., Czettel C., Pohler M., Schalka N. Influence of multilayer architecture on microstructure and fracture properties of arc evaporated TiAlTaN coatings. Surface and Coatings Technology. -2022 (433), 128098.

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕШАННОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; zhornikv@gmail.com

Смазочные материалы (СМ) в настоящее время в подавляющем большинстве изготавливаются на основе нефтепродуктов, которые содержат сильнейшие канцерогены, и, попадая в окружающую природную среду, СМ создают для неё биотоксикологические угрозы. Минеральные (нефтяные) масла трудно поддаются биоразложению под воздействием содержащихся в окружающей среде микроорганизмов. При этом естественная система разложения оказывается перегруженной из-за значительных объёмов накопления этих продуктов в результате непредвиденных или технологически обусловленных их утечек.

Одним из перспективных вариантов решения этой проблемы является использование сырья растительного происхождения. Однако при этом следует иметь в виду такие существенные недостатки растительных масел, состоящих, главным образом, из триглицеридов жирных кислот, как их лёгкая окисляемость на воздухе и склонность к полимеризации с течением времени, обусловленные, в частности, наличием ненасыщенных связей в структуре триглицеридной молекулы. Поэтому применение смазочных материалов, содержащих в своём составе дисперсионную среду (ДС) полностью в виде растительного масла (или смеси растительных масел), целесообразно только в случаях относительно кратковременного периода их использования (проточное смазывание, частая замена смазочного материала) и при условии хранения СМ в герметичных ёмкостях без доступа воздуха.

В этой связи, представляется, более рациональным создавать экологически безопасные биоразлагаемые смазочные материалы (ЭБ БСМ) на основе смеси растительных и минеральных масел с выбором соотношения между их содержанием в ДС, исходя из требуемого уровня работоспособности (реологические и трибологические свойства, ресурс), и желаемой скоротечности процесса биодеструкции продукта при его утилизации, а также случайном или технологически обусловленном попадании в окружающую среду.

Исходя из этих принципов, разработаны составы и способы получения гаммы пластичных смазок с различными загустителями и жидких ЭБ БСМ для пыльных цепей на основе смешанной дисперсионной среды, содержащей растительное (рапсовое) и высокоочищенное минеральное III группы по классификации API (American Petroleum Institute) масел [1]. При этом предложены технологические приёмы получения ЭБ БСМ, минимизирующие негативное влияние воды и высоких температур на раститель-

ный компонент дисперсионной среды при получении ЭБ БСМ, обеспечивая повышенный уровень реологических и трибологических свойств и их стабильность в течение не менее 12 месяцев при хранении в открытой таре со степенью биоразлагаемости СМ более 80 %.

В частности, разработаны экологически безопасные пластичные смазочные материалы (ЭБ БСМ) на кальциевом (смазка СОЛИДОЛ БИО, ТУ ВУ 190410065.022-2020), литий-кальциевом (смазка OIMOL CL BIO, ТУ ВУ 190410065.021-2020), комплексном сульфат кальциевом (смазка OIMOL KSC BIO, ТУ ВУ 190410065.023-2021) и комплексном литиевом (смазка ИТМОЛ-150 БИО, ТУ ВУ 190410065.024-2022) загустителях.

Преимуществом ЭБ БСМ является повышение степени их биоразлагаемости, которая находится на уровне 81—83 %, что в 4—5 раз выше биоразлагаемости, например, смазок Солидол Ж и Литол-24. При этом отличительной особенностью пластичной смазки OIMOL KSC BIO являются высокая нагрузочная способность (нагрузка сваривания $P_c = 6200$ Н), повышенная термическая стойкость (температура каплепадения $T_{кп} = 225$ °С), улучшенная коллоидная стабильность (4 %), что обусловлено специфичным строением её гетерогенной дисперсной фазы, представляющей собой структурно подвижный пространственный каркас из совокупности частиц термически стойкого нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров, обеспечивающих сродство с растительным компонентом ДС.

Разработанное биоразлагаемое всесезонное масло для цепей бензопил ECO CS BIO (ТУ ВУ 190410065.018-2019) по своим техническим характеристикам (вязкость кинематическая при 40 °С $\eta = 60$ мм²/с, нагрузка сваривания $P_c = 2763$ Н, показатель износа $D_H = 0,39$ мм, температура застывания $T_3 = -28$ °С, температура вспышки $T_{вс} = 282$ °С) не уступает маслу для пыльных цепей марки Husqvarna Bio Advanced при степени биоразлагаемости 93 %.

На предприятиях ООО «Евразия Лубрикантс» (г.п. Заславль) и ОДО «Спецсмазки» (г. Минск) организовано промышленное производство разработанных ЭБ БСМ, которые реализуются для предприятий лесного хозяйства, транспортной сферы и различных отраслей промышленности республики.

1. Жорник В. И., Запольский А. В., Ивахник А. В., Дудан А. В. Технологии и оборудование для производства биоразлагаемых пластичных смазок // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2022, № 3, 32—43

РАЗВИТИЕ АССОРТИМЕНТА ТРУБ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ГИДРОТРАНСПОРТА ВЗВЕСИ С РАЗЛИЧНЫМ РАСЧЁТНЫМ РЕСУРСОМ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

В.В. Коврига

ООО «Группа Полимертепло»

Существующая практика применения полиэтиленовых труб для гидротранспорта обычно строится на справочных данных об износостойкости различных видов полиэтилена, что препятствует расширению объёмов применения полиэтиленовых труб в системах гидротранспорта пульпы.

Для преодоления этого недостатка на предприятиях группы «Полипластик» организуется производство как напорных, так и безнапорных труб, с различным расчётным ресурсом износостойкости.

Среди методов оценки износа, позволяющих определить расчётный ресурс износостойкости, только один метод испытания на износ, согласно требованиям стандарта EN 295-3, позволяет получить данные необходимые для определения расчётного ресурса трубопроводов. Поскольку пробег взвеси по полиэтиленовым трубам в ходе испытаний составляет 100 и более км.

Расчётный ресурс определяется не только износостойкостью материала, но и геометрией трубы, диаметром и толщиной стенки. Поскольку, для потребителя решающее значение имеет ресурс работоспособности, получение труб, различающихся по ресурсам, позволяет полнее обеспечивать требования потребителей. С целью обеспечения исходных экспериментальных данных, необходимых для оценки расчётного ресурса износостойкости были проведены испытания продукции, выпускаемой на всех 12 заводах Группы «Полипластик».

В таблице 1 показаны типоразмеры труб, материал из которого трубы изготовлены и величины расчётного ресурса износостойкости для труб, выпускаемых на предприятиях группы.

Как видно из приведённых данных, трубы, выпускаемые предприятиями из одинаковых материалов, существенно различаются по расчётному ресурсу износостойкости, в несколько раз. Что свидетельствует о необходимости совершенствования технологии получения полиэтиленовых труб, оптимизированных по показателю износостойкости. Как видно в некоторых случаях, удаётся поднять ресурс износостойкости в 5—6 раз.

Расчётный ресурс износостойкости оценивается в км потока взвеси, которые должны пройти по трубе, до тех пор, пока толщина её стенки не уменьшится на 75%.

В соответствии с показателями расчётного ресурса износостойкости трубы делятся на три категории:

1 категория – трубы с расчётным ресурсом более 10000 км

2 категория – трубы с расчётным ресурсом 5000 км

3 категория – трубы с расчётным ресурсом 2500 км

Аналогичная программа реализуется сегодня и для безнапорных самотёчных труб.

Для определения полного ассортимента труб с заданным расчётным ресурсом износостойкости используется часть труб, выпускаемых для нужд водоотведения, транспортировки газа и сточных вод. При этом отбираются трубы с диаметром от 150 мм до 630 мм и величинами SDR 9;11;13,6.

Важным элементом является выбор отрезка, на котором выполняются базовые замеры износостойкости. Сегодня этот отрезок рекомендуется как разница между износом при 100 000 циклов и 75 000 циклов. В таблице 2 приведены значения измеренных величин износа при 25, 50, 75 и 100 тысяч циклов. При частоте колебаний 20 циклов в минуту.

Таблица 1. Расчётный ресурс

SDR	Наружный диаметр мм	Толщина стенки мм	Марка сырья	Расчётный ресурс, км
ЮТБ 17	160	9,5	2НТ 11-9	3500
ЮТБ 17	180	10,7	2НТ 11-9	3300
ОЗТИ 13,6	160	11,8	2НТ 11-9	12600
ОЗТИ 17	250	14,8	2НТ 11-9	16800
ОЗТИ 17	225	13,4	2НТ 11-9	4000
ОЗТИ 11	180	16,4	2НТ 11-9	5300
Кохановский трубный 3-д 13,6	225	16,6	2НТ 11-9	11300
Кохановский трубный 3-д	160	9,5	2НТ 11-9	3500
ИТЗ 13,6	160	11,8	2НТ 11-9	4400
ИТЗ 17	315	18,7	Н1000РС Thai	8700
Арыстан SDR17	160	9,5	2НТ 11-9	2500
Арыстан SDR17	250	11,9	2НТ 11-9	8100
Белтрубпласт SDR 13,6	225	16,6	2НТ 11-9	5100
Сибгазппарат SDR17	225	13,4	2НТ 11-9	9100
Сибгазппарат SDR17	160	9,5	2НТ 11-9	3700
Италсовмонт SDR 13,6	160	11,8	2НТ 11-9	5200
КТЗ 17	110	6,6	ПЭ100RC	16500
КТЗ 17,6	160	9,1	2НТ 11-9	3700
КТЗ 11	225	20,5	Sabic Vestolen A6060R 10000	6400

Таблица 2. Величины износа

Марка образца трубы	Средняя величина потери толщины стенки $\Delta_{\text{ист}}$, мм			
	25000 циклов	50000 циклов	75000 циклов	100000 циклов
ПЭ100RC	0,04	0,06	0,07	0,10
2НТ 11-9	0,08	0,18	0,28	0,36
ПЭ100 Sabic Vestolen A6060R 10000	0,1	0,24	0,36	0,45

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 1

Структура и свойства композиционных материалов

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)

28—30 июня 2022 г., Гомель, Беларусь

УПРОЧНЕНИЕ ПА6 И ЕГО КОМПОЗИТОВ С МОНТМОРИЛЛОНИТОМ ДОБАВКАМИ МАЛЕИНИЗИРОВАННОГО НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИБУТАДИЕНОвого КАУЧУКА

В.Н. Адери́ха*, В.Н. Коваль, В.А. Шаповалов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, *vnad@tut.by

Введение. Одним из эффективных методов модифицирования поликонденсационных полимеров, и полиамидов в частности, является применение бифункциональных и многофункциональных удлинителей цепи (УЦ), позволяющих увеличить молекулярный вес в реакциях линейного удлинения цепи при взаимодействии концевых групп с диизоцианатами, бислактамами, диангидами, бисоксазолинами или в реакциях ветвления/сшивания при взаимодействии с многофункциональными УЦ, представленных олигомерами с высоким содержанием реакционноспособных изоцианатных, эпоксидных, малеинангидридных групп.

Цель работы — исследовать влияние малеинизированного низкомолекулярного полибутадиенового каучука СКДН-М на структуру и свойства полиамида ПА6 и его нанокомпозитов с глинами.

Объекты и методы исследований. Полиамид 6 (ПА6) и его композиции с 3 мас.% каучука СКДН-М (ООО «ДОРЭС», Россия) и 3 мас.% монтмориллонита Cloisite- Na^+ (ММТ) и органофилизированного ММТ марки Cloisite-30B (Cl-30B) получали расплавной экструзией и перерабатывали литьем под давлением. Структуру и механические свойства образцов изучали методами ДСК, РСА, СЭМ, статических и динамических механических испытаний.

Результаты и обсуждение. Результаты механических испытаний композитов показывают, что введение 3 мас.% СКДН-М приводит к значительному увеличению модулей упругости и прочности при растяжении и изгибе как ПА6, так и его композитов с глинами. Зависимости напряжение-деформация при растяжении ПА6 и его композитов с ММТ, содержащих добавку СКДН-М, демонстрируют значительное повышение напряжения вытяжки и предельного удлинения композитов при введении СКДН-М (рис. 1), что связывают с увеличением молекулярной массы, обуславливающим рост плотности узлов зацеплений в физической или степени сшивания в химической сетке [1, 2].

Увеличение молекулярной массы ПА6 в присутствии СКДН-М подтверждают также результаты ДМА (рис. 2), показывающие уменьшение величины $\text{tg}\delta$ ПА6 в области высокоэластичности, обусловленное снижением концентрации свободных хвостов макромолекул, являющихся одним из источников повышенных механических потерь на внутреннее трение [2].

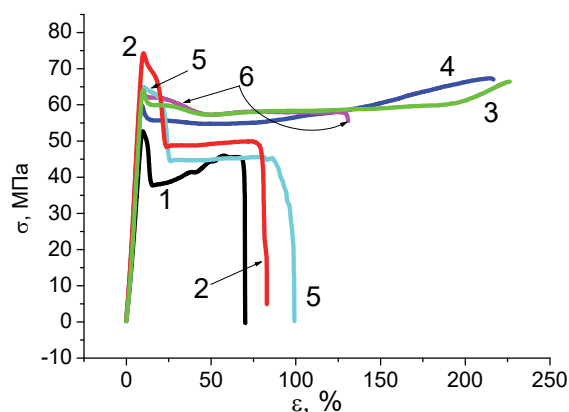


Рис. 1 Зависимость напряжение-деформация при растяжении исходного ПА6 (1) и его композитов, содержащих добавку ММТ (2), СКДН-М (3), СКДН-М/ММТ (4), Cl-30B (5) и СКДН-М/Cl-30B (6).

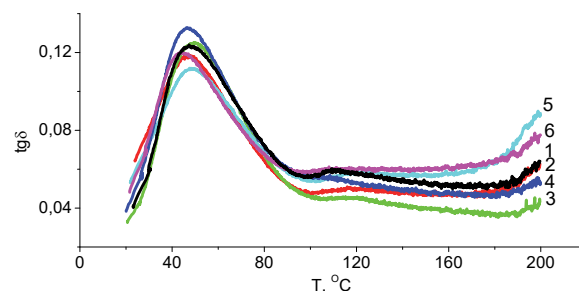


Рис. 2 Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры. Обозначения см. рис. 1

Протекание процессов удлинения и, вероятно, ветвления макроцепей ПА6 вследствие взаимодействия его концевых amino- и амидных групп с малеинангидридными группами СКДН-М подтверждается значительным (до 2 порядков) снижением ПТР композитов. Это повышает эффективность диспергирования и усиливает ориентацию пластинок слоистых силикатов при течении расплавов, что оказывает дополнительный упрочняющий эффект, зависящий от конструкции литевых форм и ориентации образцов относительно испытательного напряжения.

1. L.E. Govaert, T.A.J. Tervoort Strain hardening of polycarbonate in the glassy state: Influence of temperature and molecular weight // J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys. 42(11):2041–2049
2. Л. Нильсен Механические свойства полимеров и полимерных композиций Москва, Химия, 1978, 302 с.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДА Р-ОДФО И ГРАФЕНА ДЛЯ ТКАНЕВОЙ ИНЖЕНЕРИИ

А.М. Камалов¹, Е.М. Иванькова^{1,2}, Е.Н. Попова², А.Л. Диденко²,
И.П. Добровольская^{1,2}, К.А. Колбе^{1,2}, М.Э. Борисова¹, В.Е. Юдин^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;
spb.kamalov@gmail.com

²Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Введение. Композиционные материалы для тканевой инженерии должны обладать механическими и электрофизическими свойствами, а также структурой, близкой аналогичным характеристикам живой ткани, т.е. обладать биомиметическими свойствами. В качестве матриц используют полимеры природного происхождения: хитозан, полигидроксibuтират, полилактиды, желатин, альгинат, фиброин, а также синтетические — полисилоксаны и ароматические полиимиды, обладающие более высокими механическими свойствами и химической стабильностью.

Полиимиды (ПИ) используются в медицинской технике для биоэлектродов, сердечно-сосудистых катетеров, устройств для доставки стентов и лекарств [1]. Отличительной особенностью материалов из PI является высокая стабильность механических, диэлектрических и термических свойств в широком диапазоне температур от –200 до + 400 °С. Биологические свойства полиимидов зависят от их химического строения, надмолекулярной структуры материалов на их основе и способов получения. Для придания полиимиду электропроводящих свойств, его использования в биомедицинских технологиях, необходимо введение электропроводящего наполнителя.

Целью работы являлось разработка композиционных материалов на основе ПИ Р-ОДФО и графена, исследование их электрофизических свойств, а также на пролиферативную активность первичных дермальных фибробластов человека.

Материалы и методы. В качестве матрицы композиционной пленки был выбран полиимид Р-ОДФО, химическая формула которого представлена на рисунке 1.

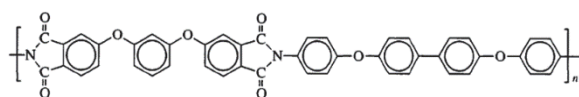


Рис. 1. Химическая формула полиимид Р-ОДФО

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ, Supra-55 VP, Carl Zeiss) использовалась для исследования тонкой структуры композитных пленок в режиме вторичных электронов.

Методом ДСК исследованы композиционные пленки Р-ОДФО с добавками Графена в количестве 0,5, 1 и 3% на приборе DSC 204 F1 (фирма Netzsch, Германия).

Электрическую проводимость пленок на постоянном токе измеряли при 25 °С с помощью пикоамперметра Keithley 6487, использовали как 2-х электродную, так и 4-х электродную схемы.

Частотную зависимость электропроводности ПИ и композиционных пленок получали на широкополосном диэлектрическом спектрометре Concept 22 Novocontrol Technologies

Механические свойства образцов исследовали на универсальной испытательной машине Instron 5943.

Краевой угол смачивания полиимидной и композиционных пленок пленки определяли методом лежащей капли на приборе DSA3.

Для определения биосовместимости полученных композитных пленок использовали МТТ-тест.

Результаты и обсуждения.

Получены электропроводящие композиционные пленки на основе полиимид Р-ОДФО и графена. Исследование их структуры показало, что пленки, содержащие 0,5, 1,0 и 3,0 мас.% графена характеризуются наличием пор с размером 2—10 мкм, стенки которых состоят из ПИ в аморфном состоянии и наночастиц графена.

Показано, что с увеличением содержания графена, прочность пленок уменьшается с 95 до 20 МПа и относительное удлинение с 55 до 5 %, краевой угол смачивания изменяется от 77 до 10 град, что свидетельствует о существенном росте влагопроницаемости пленок, при этом удельная электропроводность композиционных пленок растет от 10⁻¹⁵ до 10² См/м. При введении наночастиц графена, значение электропроводности не зависит от частоты электрического поля, что свидетельствует о высокой плотности зарядов.

По результатам МТТ теста можно заключить, что композиционные пленки на основе Р-ОДФО и графена обладают биосовместимостью, поэтому могут быть использованы в качестве плоских биоэлектродов.

Благодарности. Авторы благодарят Российский научный фонд за поддержку исследований в рамках гранта № 19-73-30003

1. Constantin, C.P.; Aflori, M.; Damian, R.F.; Rusu, R.D. Biocompatibility of Polyimides: A Mini-Review. Materials 2019, 12, 3166.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИКОВЫХ ЛЫЖ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич

Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, elenagapankova@gmail.com

Работа посвящена анализу результатов испытаний спортивно-беговых пластиковых лыж, изготовленных с применением разрабатываемых отечественных препрегов.

Разрабатываемые композиционные материалы, нашедшие применение при производстве спортивно-беговых пластиковых лыж, представляют собой готовые для переработки однослойные армирующие наполнители в виде однонаправленных директрингов (ровингов) или рубленых волокон, предварительно пропитанных специальным связующим в неотвержденном состоянии. Связующее представляет собой композицию на основе эпоксидной смолы, разработанного отвердителя и различных функциональных добавок. Однонаправленные препреги имеют наибольшее распространение, т.к. являются определяющими по требованиям относительно жесткости конечного продукта. Такой полуфабрикат имеет вид двусторонней клейкой ленты с защитным покрытием (плёнкой) с одной или двух сторон. Лыжа представляет собой многослойную структуру, в которой препреги несут функцию армирующего (прочностного) и склеивающего слоя и применяется для объединения различных по природе функциональных слоев — скользящий (полимер), несущий (дерево) и декоративный (полимер).

Для изготовления отечественных препрегов использовали однонаправленную ленту на основе директринга стеклянного производства ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и строительной стекловаты. Препреги изготовлены на лабораторной пропиточной установке. С их использованием были изготовлены экспериментальные лыжи в количестве 30 шт. (15.03.2022 и 19.04.2022). Технологичность использования отечественных образцов препрегов осуществлялась визуально при сборке лыжного пакета (клин, препрег и препрег-флис), и характеризуется как удовлетворительная. Изготовленные образцы лыж прошли полную обработку, включающую торцовку, фрезерование, циклевку, нарезание желоба, шлифование с нанесением структуры, за исключением стадии отделки (нанесение лака).

Экспериментальные лыжи прошли комплекс механических испытаний в БГТУ согласно «Методики испытания 01.12.00.000 ПМ1». Особое внимание уделялось нормируемым показателям, таким как: «Стрела прогиба», «Индекс жесткости FA», «Разрушающая нагрузка», «Показатель усталости», «Жесткость задней части лыжи» и «Жесткость пе-

редней части лыжи».

Стрела прогиба не превысила допустимые 30 мм практически для всех образцов, за исключением лыж, полученных в определенной пресс-форме (отмечена при изготовлении). Лыжи, склеенные в указанной пресс-форме, имеют отклонения от заданной пресс-формой геометрии носочной и пяточной части.

Один из важнейших эксплуатационных показателей лыжи — индекс жесткости FA (индекс Фишера) — обеспечивается: 1) собственно жесткостью средней части, которая зависит, во-первых, от постоянных для всех лыж параметров как геометрии клина, свойства армирующих слоев, во-вторых, от жесткости древесной части клина; 2) геометрией нижней (скользящей) поверхности. По данному показателю лыжи соответствуют нормативным значениям.

Экспериментальные лыжи имеют длину 1800 мм. Т.к. для лыж длиной 1650 и 1750 мм нормативное значение нагрузки составляет 1766 Н, длиной 1850 и 1950 — 2354 Н, по методу линейной интерполяции можно определили значение нагрузки для экспериментальных лыж: 2060 Н. По данному показателю лыжи соответствуют нормативным значениям.

Показатель усталости выражается отношением разности стрелы прогиба лыжи, образовавшейся в результате циклического нагружения, к первоначальной стреле прогиба лыжи и не должен превышать 60%. Показатель изучен на отдельных образцах лыж и рассчитан после выдержки лыжей нагрузки в виде циклических нагружений в количестве 50 тыс. Испытанные лыжи имеют следующие значения показателя усталости: 29,2%, 20,08% и 15,61%. Целостность лыж не была нарушена.

Жесткость задней и передней части лыжи для большинства образцов завышена. Данный факт, вероятно, обусловлен тем, что для увеличения жесткости лыжи при ее склеивании используется дополнительное армирование препрегом. Однако, неоднократно отмечено (в ходе эксплуатации спортсменами), что носочная часть должна быть жестче, пропитанной в соответствующих стандартах.

Основываясь исключительно на результатах проведенного комплекса испытаний и исследований образцов экспериментальных лыж, разработанные в ИФОХ НАН БЕЛАРУСИ препреги по большинству показателей позволяют обеспечивать требуемые показатели качества лыж на уровне образцов лыж, изготовленных из импортных препрегов.

ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ И
МИНИМАЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ИНГРЕДИЕНТОВА.Н. Буркин¹, А.Н. Радюк¹, Ю.В. Дойлин¹,
В.М. Шаповалов², С.В. Зотов², А.А. Тимофеев²¹Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь, ana.r.13@mail.ru²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. На сегодняшний день одним из перспективных путей создания материалов разной структуры и с необходимым комплексом свойств является физико-химическая модификация существующих полимеров, их комбинация с веществами иной природы и структуры как в процессе синтеза, так и при переработке [1].

Целью данной работы является разработка технологии получения гранулята и полимерной основы с минимальным количеством ингредиентов для получения материалов с заданными свойствами.

Материалы и методы. Основным компонентом материалов являются переработанные отходы ППУ, представляющие собой облой, литники, стактиты, бракованные подошвы, образующиеся при производстве обуви и являющиеся вторичным материальным ресурсом для новых полимерных материалов.

Вторичная переработка отходов пенополиуретанов (ППУ) является актуальной задачей, т.к. позволяет не только существенно сократить загрязнение окружающей среды, но и служит источником расширения сырьевой базы производств, а также экономии денежных и трудовых ресурсов.

В рамках работы разработана технология получения гранулята, включающая такие стадии как измельчение отходов ППУ, сушку, смешивание и гранулирование. Разработан состав гранулята, состоящий из отходов ППУ и масла вазелинового в качестве пластифицирующей добавки [2, 3].

На основе гранулята отходов ППУ получали полимерную основу с минимальным количеством ингредиентов по технологии, включающей подготовку ингредиентов, смешивание, гранулирование и литье. Минимальное количество ингредиентов включает в себя гранулят отходов ППУ; пластификатор, необходимый для повышения пластичности и эластичности, а также улучшения процесса переработки и получения готовых изделий; стабилизатор, способствующий повышению стойкости полимера к различным видам воздействий, замедляющий деградацию и старение композиции и готовых изделий в целом.

Возможность получения полимерной основы с минимальным количеством ингредиентов проверялась экспериментальным путем при совмещении 100,0 мас. ч. гранулята отходов ППУ с минимальным количеством пластификатора и стабилизатора,

составляющих 1,0 мас. ч.

Полученные образцы в виде полимерной основы исследовали по показателям, представленным в табл. 1, исследование структуры (рис.1) проводили с помощью микроскопа BestScope BPM-130.

Таблица 1. Физико-механические характеристики полимерной основы

Показатель	Значение
плотность (ρ), г/см ³	1,23
твёрдость (Н), усл. ед.	86
абразивный износ (V_i), мм ³ /м	79
относительное удлинение (ϵ), %	140
разрушающее напряжение (σ), МПа	15
модуль упругости (Е), МПа	24



Рис. 1. Структура полимерной основы

По рис. 1 установлено, что образец имеет рыхлую слегка пористую структуру, поры хорошо сформированы, имеют малые диаметры правильной шарообразной формы 2—3,5 мкм, дополнительных включений и дефектов не найдено.

Результаты и их обсуждение. В рамках работы установлено, что структура полученных образцов удовлетворяет требованиям к структурам для производства материалов для низа обуви, физико-механические характеристики образцов выше значений, регламентированных в стандарте. В связи с этим из полученной полимерной основы с минимальным количеством ингредиентов (гранулят отходов ППУ + добавки) можно в дальнейшем производить материалы для подошв обуви.

1. Ершова О.В., Ивановский С.К., Чупрова Л.В., Бахаева А.Н. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 4–1. – С. 14–18
2. Радюк, А.Н. Материалы для низа обуви на основе гранулята вторичного полиуретана / А.Н. Радюк, А.Н. Буркин // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. материалов XXIII Международ. науч.-практ. форума «SMARTEX-2020», 20–23 октября 2020 года. – Иваново: ИВГПУ, 2020. – С. 432–436.
3. Радюк, А. Н. Granulate from polyurethane waste for the production of shoe soles / А. Н. Радюк // Education and science in the 21st century: articles of the V International Scientific and Practical Conference, Vitebsk, November 29, 2020 / Vitebsk State Technological University. - Vitebsk, 2020. - P. 43–46.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПВС- $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ /ПАН МЕМБРАН ДЛЯ ДЕГИДРАТАЦИИ ЭТАНОЛА

Е.С. Бурть¹, Т.В. Плиско¹, В.Г. Прозорович², А.И. Иванец², А.В. Бильдюкевич¹

¹Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь; katyaburt@gmail.com

²Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Цель работы заключалась в разработке новых нанокompозитных мембран с селективным слоем на основе поливинилового спирта (ПВС) и наночастиц алюмосиликата ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$), сформированного в динамическом режиме (режиме тупиковой ультрафильтрации), на поверхности ультрафильтрационной мембраны-подложки на основе полиакрилонитрила (ПАН). Проведено исследование зависимости структуры селективного слоя и транспортных свойств в процессе вакуумной первапорации при дегидратации этанола от концентрации наночастиц алюмосиликата.

Материалы и методы. Ультрафильтрационные мембраны на основе ПАН на подложке из полиэфирного нетканого материала, разработанные в ИФОХ НАН Беларуси, использовали в качестве мембраны-подложки для получения нанокompозитных мембран. Удельная производительность ПАН мембран составила 400—500 л·м⁻²/ч, а коэффициент задерживания по поливинилпирролидону К30 ($M_n = 40000$ г/моль, Fluka, Германия) — 50—60%. ПВС ($M_n = 145000$ г/моль, 17-99, Китай) использовали для формирования селективного слоя нанокompозитных мембран. Глутаровый альдегид и концентрированную соляную кислоту использовали для сшивания ПВС. В качестве добавки в селективный слой на основе ПВС использовали гидрозолю $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ (рН 2,8, концентрация дисперсной фазы 2,0 мас.%, средний размер частиц — 39 нм). Концентрации реагентов выбрали, основываясь на результатах предыдущего исследования [1]. Концентрацию наночастиц алюмосиликата варьировали от 5 до 25 мас.% по отношению к массе полимера в растворе, используемом для формирования селективного слоя. Селективный слой нанокompозитных мембран наносили в режиме тупиковой ультрафильтрации при трансмембранном давлении 3 атм в течение 10 мин при 20 °С. Транспортные свойства полученных нанокompозитных мембран были исследованы в процессе вакуумной первапорации смеси 90 мас.% этанол / 10 мас.% вода. Стабильность полученной нанокompозитной мембраны была изучена при разделении смеси этанол/вода с концентрацией воды 10, 20, 50, 80 и 100 мас.%, а также при дегидратации смеси, содержащей 90 мас.% этанола, но при различных температурах разделяемой смеси: 25, 35 и 50 °С.

Результаты и их обсуждение.

Показано, что введение наночастиц алюмосиликата в селективный слой нанокompозитных мем-

бран приводит к увеличению его толщины (рис. 1).

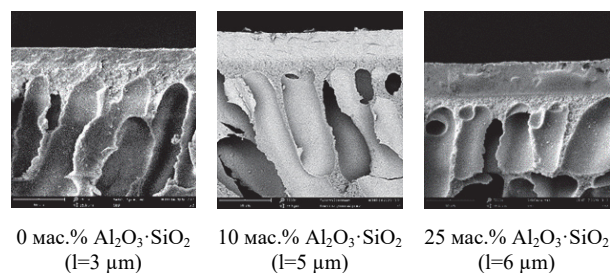


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии сколов поперечного сечения нанокompозитных мембран

Установлено, что шероховатость поверхности исходной мембраны ПВС/ПАН ($R_a = 0,59$ нм, $R_q = 0,76$ нм) ниже шероховатости поверхности модифицированных мембран (для мембраны с 25 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ — $R_a = 0,80$ нм, $R_q = 0,97$ нм).

Показано, что удельная производительность нанокompозитных мембран снижается, а содержание воды в пермеате увеличивается с увеличением концентрации наночастиц алюмосиликата в селективном слое мембраны (рис. 2А). Установлено, что наиболее эффективной в данном процессе является мембрана с содержанием наночастиц 10 мас.%. Введение наночастиц алюмосиликата приводит к дополнительному сшиванию селективного слоя, за счет чего при повышении содержания воды в разделяемой смеси мембрана характеризуется большей стабильностью (рис. 2Б).

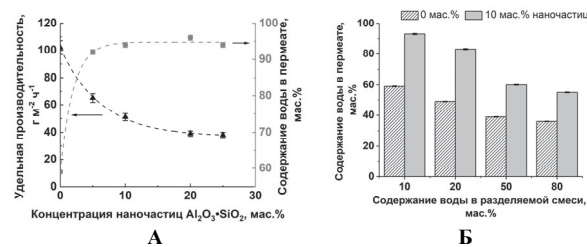


Рис. 2. А- зависимость удельной производительности и содержания воды в пермеате от концентрации наночастиц $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$. Б- зависимость содержания воды в пермеате от содержания воды в исходной смеси для исходной и модифицированной мембран.

Установлено, что нанокompозитные мембраны характеризуются более высокой устойчивостью при увеличении температуры разделяемой смеси (90 мас.% этанол / 10 мас.% вода).

7. Burts K. S. [et al.]. Development of dynamic PVA/PAN membranes for pervaporation: correlation between kinetics of gel layer formation, preparation conditions, and separation performance // Chem. Eng. Res. Des. — 2022. (182), 544-557.

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКИХ МЕМБРАН ПВС/ПАН ДЛЯ ПЕРВАПОРАЦИИ

Е.С. Бурть¹, Т.В. Плиско¹, Г. Ли², И. Куява², В. Куявский², А.В. Бильдюкевич¹¹Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь; katyaburt@gmail.com²Университет Николая Коперника в г. Торунь, Торунь, Польша

Цель данной работы — установить взаимосвязь между кинетикой образования геля-слоя за счет концентрационной поляризации и условиями получения композиционных мембран для первапорации в динамическом режиме (режиме тупиковой ультрафильтрации). Изучено влияние давления раствора поливинилового спирта (ПВС) и продолжительность формирования селективного слоя, а также концентраций реагентов в растворе на структуру и транспортные свойства композиционных мембран в процессе дегидратации этанола методом первапорации.

Материалы и методы. В качестве пористой мембраны-подложки для разработки композиционных использовали плоские ультрафильтрационные мембраны на основе поли(акрилонитрил-со-метилакрилатные) (ПАН) производства ИФОХ НАН Беларуси. Поливиниловый спирт (ПВС, Mowiol 28-99, $M_n = 145 \cdot 10^3$ г/моль), глутаровый альдегид (ГА) и концентрированная соляная кислота (СК) использовали для приготовления модифицирующих растворов для формирования непористого селективного слоя. Нанесение селективного слоя проводили в динамическом режиме (режиме тупиковой ультрафильтрации). Варьировали давление раствора нанесения (0,1—0,8 МПа), продолжительность нанесения (5—40 мин), концентрации ПВС (0,5—2,0 мас.%) и, соответственно, концентрации ГА и СК (соотношение ПВС:ГА:СК было постоянным и равным 16,7:1:8,3).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что увеличение концентрации полимера и продолжительности нанесения селективного слоя приводит к увеличению толщины селективного слоя. Показано, что увеличение продолжительности формирования селективного слоя и концентрации ПВС приводит к снижению удельной производительности композиционных мембран (рис. 1А). Это является результатом увеличения толщины селективного слоя ПВС.

Показано, что коэффициент разделения β зависит от времени фильтрации растворов ПВС и проходит через максимум для всех исследованных концентраций полимера (рис. 1В). Низкие значения коэффициента разделения для мембран, полученных при фильтрации растворов в течение 5 мин, обусловлены неполным перекрытием пор мембраны-подложки или недостаточной толщиной слоя геля ПВС.

Зависимость нормированного по толщине индекса эффективности разделения от времени фильтрации показало, что наиболее эффективной при

разделении смеси этанол/вода в процессе первапорации является мембрана, селективный слой которой получен при фильтрации 1 мас.% раствора ПВС в течение 10 минут.

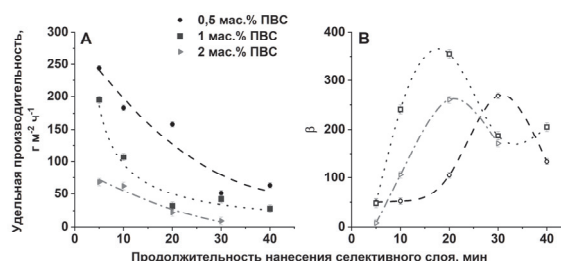


Рис. 1. Удельная производительность (А) и фактор разделения (В) композиционных мембран, полученных нанесением раствора ПВС различной концентрации, от продолжительности нанесения

Установлено, что толщина селективного слоя композиционных мембран увеличивается также при повышении давления раствора при нанесении селективного слоя от 2 мкм при 0,1 МПа до 12 мкм при 0,8 МПа. Зависимость удельной производительности мембран при разделении смеси этанол/вода проходит через максимум при трансмембранном давлении 0,3 МПа. Показано, что дальнейшее увеличение давления раствора выше 0,3 МПа приводит к формированию более толстого и плотного селективного слоя. Однако мембраны, селективный слой которых нанесен при 0,4–0,8 МПа, имеют очень близкие значения удельной производительности и содержание воды в пермеате.

Для исследования влияния концентрации ГА и СК была зафиксирована концентрация ПВС (1 мас.%). Установлено, что мембраны, полученные при фильтрации растворов, содержащих 0,1 мас.% ГА, характеризуются наибольшей удельной производительностью, однако наименьшей селективностью. Обнаружено, что композиционные мембраны, полученные при фильтрации раствора с 0,06 мас.% ГА являются наиболее эффективными в процессе первапорации 90 мас.% этанола /10 мас.% воды.

Зависимость удельной производительности композиционных мембран от концентрации ГА проходит через максимум при концентрации 0,5 мас.%. Содержание воды в пермеате практически не изменялось (95—96 мас.%) при всех исследованных концентрациях СК. Установлено, что наиболее эффективными для дегидратации этанола 90 мас.% являются мембраны, полученные при фильтрации раствора, содержащего 0,5 мас.% СК.

ОГНЕЗАЩИЩЕННЫЕ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИЕ КОМПОЗИТНЫЕ ПАСТЫ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НА ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А.Н. Назарович, О.В. Рева, А.В. Врублевский

ГУО УГЗ МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь; volha107@rambler.ru

Введение. Одной из важных задач при разработке защитной одежды для пожарных и других опасных профессий является создание гибких теплоотражающих огнестойких материалов на текстильной основе. Свето- и теплоотражающие материалы получают в основном приклеиванием металлизированных пленок, ракельным нанесением взвеси металлической пудры в полимерном связующем (на основе каучуков, поливинилацетата, фторопластов и других пластичных полимеров), с последующим отверждением, вулканизацией, приплавлением и др. [1, 2]. До настоящего времени нерешенной проблемой является как подбор полимерного связующего, так и свойства композитного изделия, в особенности его суммарная огнестойкость. Часто при использовании металлических дисперсий в полимерных связующих требуется введение в композицию замедлителей горения. В подавляющем большинстве случаев используются галоген или фосфорсодержащие органические производные, поскольку они хорошо совместимы с полимерными растворами и дисперсиями различной химической природы и обеспечивают надежный огнезащитный эффект. Неорганические композиции, являющиеся эффективными замедлителями горения, в частности аммонийные металлофосфаты, используются значительно реже, поскольку их совместимость с различными смолами и полимерными дисперсиями плохо изучена; часто не удается получить однородную и достаточно текучую композицию.

Результаты и обсуждение. Нами была изучена совместимость неорганических аммонийно-полифосфатных и комплексных замедлителей горения с акриловыми и силиконовыми связующими. При добавлении от 5 до 20 мас.% неорганических аммонийно-фосфатной и полифосфатной композиций от массы акриловой пасты образовывалась однородная суспензия, которую механическим намазыванием наносили ее на образцы полиэфирных, арселеновых и смесовых тканей. В результате проведенных исследований было установлено, что условия сушки (при 100—150 °С или на воздухе) огнезащитной акриловой пасты на текстильной поверхности практически не оказывают влияния на огнестойкость конечной системы. Тогда как химическая природа замедлителя горения и его массовое содержание в акриловой пасте являются основными определяющими факторами. Так, высокополимеризованная полифосфатная композиция не обеспечивает прекращение горения испытываемого образца даже при 20—25 мас.% в пасте, только замедляет его в ~2—4 раза. Прекращение горения обработанного материала обеспечивает только фосфатная композиция,

отличающаяся повышенным содержанием аммонийной компоненты, отвечающей за выделение азотсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу с прекращением в ней радикальных процессов. Требуемая по ГОСТ огнестойкость обработанной тканевой подложки достигается при содержании антипирена в пасте не менее 20 мас.%, что повышает ее вязкость и отрицательно сказывается на технологических показателях.

Поскольку акриловые композиции с неорганическими замедлителями горения характеризуются рядом существенных недостатков, были изучены силиконовые термостойкие смолы, модифицированные как фосфинатными замедлителями горения высокотемпературного действия, рекомендуемые для огнезащиты армированных полиэфиров, высокотемпературных полиамидов или ароматических полиамидов, так и неорганическими аммонийно-фосфатными.

Огневые испытания показали, что в случае силиконовых связующих, как алюмофосфинатные огнезащитные композиции, так и аммонийно-полифосфатная в количестве 5—10 мас.% позволяют достичь требуемой по ГОСТ стойкости к горению для композитного изделия на текстильной основе различной природы – полиэфирной, арселеновой.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований выявлены оптимальные полимерные связующие, обеспечивающие равномерное нанесение на поверхность ткани однородных металлосодержащих слоев, совместимые с ними замедлители горения различной химической природы и их минимальное массовое содержание, обеспечивающее требуемую по ГОСТ огнестойкость композиционного материала. Важным моментом является то, в случае силиконовых полимерных связующих в качестве замедлителей горения высокоэффективными являются неорганические полифосфатные системы в количестве не более 10 мас.%. Это позволяет получить однородные и достаточно текучие сложносоставные композиции, пригодные не только к ракельному нанесению на текстильную поверхность, но и к пневматическому распылению с высокой адгезией к подложке, что технологически более удобно.

1. Дмитракович, Н.М., Ю.Г. Русецкий, В.В. Гнутенко и др. Сравнительный анализ технологических процессов получения огнестойких тканей с металлизированным покрытием // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2004, № 6 (16). — С. 27-35.
2. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/217/2171858.html>; Дата обращения: 20.04.2022.

АНАЛИЗ УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ ШИННЫХ РЕЗИН МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

А.П. Сазанков, С.В. Шилько, Т.В. Дробыш, Е.М. Петроковец

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, alex.saz.job@gmail.com

Введение. Шинная промышленность является одной из ключевых отраслей экономики развитых стран, в т.ч. Республики Беларусь. Для определения упруго-диссипативных характеристик шинных резин обычно применяют методы статических и динамических механических испытаний стандартных образцов, что подразумевает трудоемкую процедуру их изготовления и последующего исследования в условиях растяжения и сжатия. При сравнительном анализе указанных свойств материалов непосредственно на натурных изделиях в зоне протектора и боковины шины предпочтительны экспресс-методы неразрушающего контроля, в особенности, динамическое контактное индентирование [1]. Получаемые данные при наличии результатов релаксационных испытаний [2] и соответствующей теории позволяют прогнозировать сопротивление качению, амортизационную способность, гистерезисный нагрев при движении, а также оценивать качество материала и выполнение технологического режима изготовления автомобильных шин.

Целью работы является сопоставление упруго-диссипативных характеристик протекторной резины легковых автомобильных шин различных производителей и сезонности.

Методы исследования. В работе использовали метод динамического контактного индентирования, реализованный в приборе ИПМ-1К, разработанном в ИПФ НАН Беларуси (рис. 1) и статистическую обработку полученных результатов.

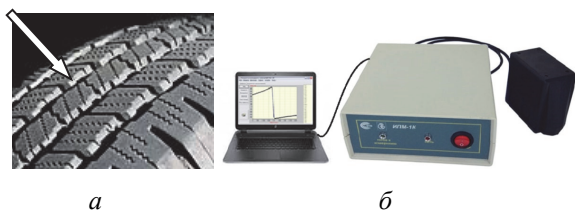


Рис. 1. Протектор автомобильной шины (стрелкой показана зона индентирования) (а) и прибор ИПМ-1К (б).

Результаты и их обсуждение. Для неразрушающего контроля беговой дорожки протектора были изучены 13 моделей летних, 7 зимних и 7 все-сезонных шин производства ОАО «Белшина» (при температуре 7,5 °С); 21 модель летней и 1 модель все-сезонной шины размерами 195/65/R15 и 205/65/R16 различных производителей, включая продукцию ОАО «Белшина»; 14 моделей шин с асимметричным и 1 модель шины с симметричным рисунком протектора, на которых помимо беговой дорожки производилось индентирование боковины вблизи протектора (при температуре 16 °С).

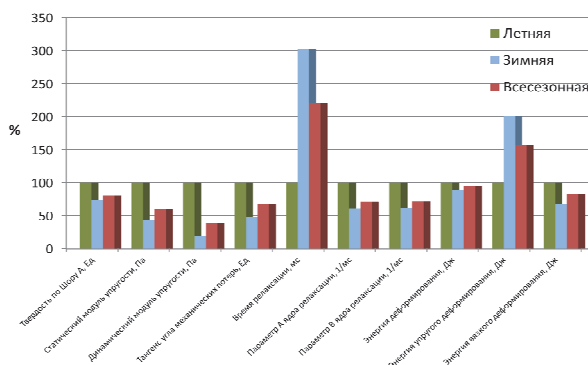


Рис. 2. Упруго-диссипативные характеристики протектора автомобильных шин производства ОАО «Белшина».

В частности, на рис. 2 приведены относительные значения твердости по Шору А, статического и динамического модуля упругости, тангенса угла механических потерь, параметров релаксации, компонентов энергии упругого и вязкого деформирования протекторной резины летних, зимних и все-сезонных шин производства ОАО «Белшина». Их сопоставление выявляет деформационные особенности изучаемых эластомерных материалов, связанные с требованиями сезонной эксплуатации шин при различной температуре. В то время, как различие энергии упругого деформирования протектора шин различной сезонности несущественно и сопоставимо с погрешностью измерений, динамический модуль упругости и время релаксации этой резины для летних и зимних шин демонстрируют кратное различие.

В докладе также сопоставляются механические характеристики материалов протектора и боковины шин различных производителей.

Заключение.

Метод динамического контактного индентирования целесообразно использовать для неразрушающего экспресс-контроля качества протекторной резины и прогнозирования ряда эксплуатационных показателей автомобильных шин.

Благодарности. Работа выполнена по заданию 4.2.3 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» и при поддержке БРФФИ (Т21ЭТ-016).

1. Рудникий В.А., Крень А.П. Испытание эластомерных материалов методами индентирования. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 227 с.
2. Шилько С.В., Дробыш Т.В., Петроковец Е.М., Сазанков А.П., Хотько А.В. Экспериментальное определение упругих и вязкоупругих характеристик шинных резин // Теор. и прикл. механика: междунар. н/т сб. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Ю.В. Василевич (гл. ред.). – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 36. – С. 114–117.

МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛО-АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ БАРЬЕРНОГО ЭФФЕКТА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

С.В. Шилько, Д.А. Черноус

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, charnavus74@gmail.com

Введение. Для эффективного охлаждения микрорезонных устройств путем теплопередачи применяют металлические композиты с дисперсным наполнителем в виде частиц алмаза, обладающего рекордно высокой теплопроводностью. Однако реализации потенциально высокой теплопроводности металло-алмазных композитов (МАК) препятствует значительное тепловое сопротивление (барьерный эффект) на границе раздела компонентов. Кроме того, пористость металлической матрицы, обусловленная введением алмазного наполнителя и растущая с увеличением его содержания, также приводит к снижению теплопроводности МАК. Для минимизации барьерного теплового сопротивления и уровня межфазных механических напряжений, поверхность алмазных частиц модифицируют плакирующим нанопокрывтием из карбидов металлов.

Таким образом, практически востребованы компромиссные значения структурных параметров получаемых таким образом четырехфазных материалов, включая объемное содержание частиц и толщину покрытия. Это предполагает разработку соответствующих моделей, методов расчета и оптимизации.

Целью исследования является разработка модели, позволяющей получить расчетную оценку эффективных термомеханических характеристик МАК с учетом особенностей их структуры.

Методы исследования. Модель двухфазного композита Таканаяги [1], позволяет получить аналитические соотношения для определения эффективных упругих модулей и предела прочности МАК. После вычисления объемного модуля упругости определяется коэффициент термического расширения композита. Расчет эффективного коэффициента теплопроводности осуществляется по модели акустического рассогласования [2] и правилу сложения тепловых сопротивлений.

Межфазный слой МАК учитывается на основе гипотезы составного включения (такое включение представляет собой композит, в котором матрицей является материал плакирующего покрытия). Для учета пористости металлической фазы последняя также представляется композитом, в котором металл наполнен полыми включениями.

Расчетный пример. Рассматривается МАК, в котором алюминиевая матрица наполнена частицами алмаза с вольфрамовым покрытием. Физико-механические характеристики компонентов, экспериментальные данные о зависимости пористости

матрицы от содержания наполнителя и экспериментальные значения эффективного коэффициента теплопроводности заимствованы из работ [2, 3].

На рисунке 1 представлены расчетные зависимости коэффициента теплопроводности алмазно-алюминиевого композита λ от объемного содержания ϕ наполнителя. Круглыми маркерами представлены экспериментальные данные [3] для композита с покрытием, треугольными — при отсутствии покрытия. Можно отметить приемлемую точность расчета коэффициента теплопроводности МАК с использованием предложенной модели.

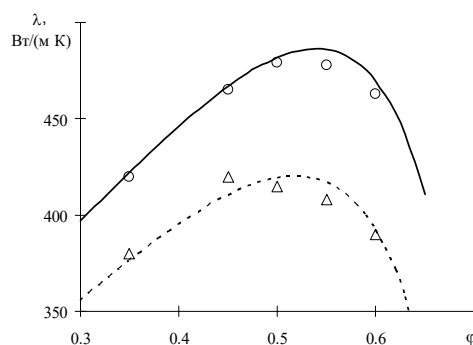


Рис. 1. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности алмазно-алюминиевого композита от объемного содержания наполнителя. Сплошная кривая – при наличии покрытия, пунктирная – при его отсутствии.

Заключение. Разработана и апробирована модель, позволяющая с приемлемой точностью прогнозировать термомеханические характеристики металло-алмазного композита с учетом особенностей его структуры и свойств.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T22КИ-032).

1. Шилько С.В., Черноус, Д.А. Модифицированная модель Таканаяги деформирования дисперсно-наполненных композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012 (18), № 4, 78–88.
2. Predicted interfacial thermal conductance and thermal conductivity of diamond/Al composites with various interfacial coatings / X. Liang [et al.] // Rare Metals – 2011 (30), 544–549.
3. Anisimova M., Knyazeva A., Sevostianov I. Effective Thermal Properties of an Aluminum Matrix Composite with Coated Diamond Inhomogeneities // Int. J. of Eng. Science. – 2016 (106), 142–154.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 2

Технологии и применение полимерных и композиционных материалов

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)

28—30 июня 2022 г., Гомель, Беларусь

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ОСНОВЕ С БИОПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

В.Ф. Луцко¹, В.В. Рубаник¹, Д.Д. Гриншпан², С.Е. Макаревич², Т.А. Савицкая²

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by

²Учреждение Белорусского государственного университета «НИИ физико-химических проблем», Минск, Беларусь, grinsphan@bsu.by

Для производства одноразовых упаковочных изделий обычно используют целлюлозные материалы такие, как бумага, картон, макулатура. Чтобы защитить целлюлозную основу от воздействия воды, жиров, масел, газов и иных факторов окружающей среды, ее ламинируют (покрывают) полиолефинами: полиэтиленом, полипропиленом и другими синтетическими гидрофобными полимерами. К сожалению, готовые изделия из этих композитов не поддаются биологическому разложению и не подлежат вторичной переработке. Поэтому они, как и обычные отработанные пластмассы, накапливаются на свалках в огромных количествах [1]. Существенно уменьшить вред, который наносят окружающей среде не утилизируемые пластики, позволят биоразлагаемые природные и синтетические полимеры. Среди этих полимеров для получения свариваемой упаковки наибольшее распространение получили материалы на основе целлюлозы, крахмалов и поливинилового спирта. Покрытие из таких полимеров являются экологически безопасными и полностью перерабатываемыми вместе с бумагой и картоном.

Естественно, для нового вида биоразлагаемого композита необходимо произвести оценку возможности изготовления из него упаковочной тары. Технологический процесс формирования и производства тары обязательно включает операцию соединения ее отдельных компонентов. Для соединения полимерных компонентов наибольшее распространение получила термо- и ультразвуковая сварка. Последняя характеризуется низким энергопотреблением, очень коротким временем сварки, простотой автоматизации и экологической безопасностью [2,3].

В работе приведены экспериментальные данные влияния параметров процесса ультразвуковой сварки на прочность соединения биоразлагаемых материалов, изготовленных в НИИ ФХП БГУ из целлюлозы, крахмала и поливинилового спирта.

Испытания проводили на установке ультразвуковой сварки изделий из термопластичных полимеров мощностью 1,2 кВт и рабочей частотой 20 кГц [4]. Сварка образцов 1 и 2 в виде прямоугольных полос размером 50×30×0,5 мм осуществлялось с использованием излучателя 3 с плоской сварочной поверхностью 3,5×140 мм внахлест по схеме, представленной на рис. 1. Для предотвращения смещения образцы с помощью прижимных планок 4 и 5 закреплялись на плоской опоре 6. Стыки выполнялись сваркой пленки на идентичную пленку.

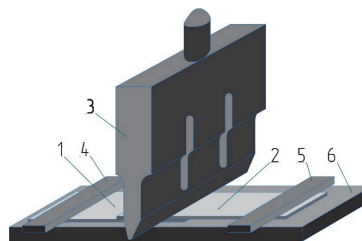


Рис. 1. Схема соединения образцов ультразвуковой сваркой: 1, 2 – свариваемые образцы, 3 – ультразвуковой излучатель, 4, 5 – прижимные планки, 6 – опора

Была проанализирована свариваемость биополимерных композитов в зависимости от переменных процесса сварки, таких как амплитуда, сварочное давление и время сварки. Диапазоны изменения амплитуды, давления и времени варьировались в пределах $34 \div 65$ мкм; $3,6 \div 10,6$ Н/мм² и $0,1 \div 0,5$ с соответственно. Время выдержки после выключения ультразвуковых колебаний составляло 1,0 с под тем же давлением, что и при сварке. Установлено, что с увеличением времени сварки увеличивается разрушающая нагрузка. Показано, что при длительности цикла 0,2 секунды, амплитуде 65 мкм и давлении сварки 10,6 Н/мм² достигается максимальное значение разрушающей нагрузки — 135 Н. При времени сварки менее 0,15 секунды не происходит образования сварного соединения. При превышении времени сварки сверх оптимального значения происходит снижение разрывного усилия примерно на 10%, что связано с термическим разложением целлюлозной основы.

Полученные результаты показывают возможность ультразвуковой сварки упаковочных материалов на основе целлюлозы с биополимерными покрытиями для изготовления упаковочной тары.

1. Geyer, R. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J. Jambeck, K. Law // Sci. Advances. – 2017. – Vol. 3, № 7: e1700782 – 5 p.
2. N. Stoeck, Ultrasonic Welding of Plasticized PLA Films / N. Stoeck, B. Baudrit, E. Haberstroh, M. Nase, P. Heidemeyer, M. Bastian // J. APPL. POLYM. SCI. 2015
3. W. Sikorska, Article Forensic Engineering of Advanced Polymeric Materials—Part VII: Degradation of Biopolymer Welded Joints / W. Sikorska, M. Zięba, M. Musioł, M. Kowalczyk, H. Janeczek, P. Chaber, O. Masiuchok, V. Demchenko, V. Talanyuk, M. Iurzhenko, J.E. Puskas and G. Adamus // Polymers 2020, 12, 1167
4. В.В. Рубаник, В.Ф. Луцко, С.Н. Шрубиков, О.С. Попова, Д.Д. Шурмелевич / Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных материалов. ПОЛИКОМТРИБ-2015 // Тезисы докладов международной научно-технической конференции — Гомель: ИММС, НАНБ, 2015

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА

Е.В. Авдеева¹, Е.Е. Шумская¹, А.В. Петкевич¹, Н.В. Дудчик², А.Д. Олейник²,
А.М. Михалко³, Х.Э. Юнусов⁴, А.А. Рогачев¹, В.Е. Агабеков¹

¹Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь avdeeva.katerina86@mail.ru

²Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены», Минск, Беларусь

³Международная Китайско-Белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

⁴Институт химии и физики полимеров Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

Модифицирование поверхности материалов осуществляется двумя способами. Формирование покрытий раствором методом позволяет получить объемное распределение модифицирующего компонента, в то время как плазмохимический метод дает возможность наносить равномерные тонкопленочные слои на лицевую поверхность волокон и использовать в качестве матрицы покрытия инертные и биосовместимые полимеры.

Цель работы. Установить особенности структуры модифицирующего компонента при использовании различных методов модификации и определить наиболее эффективный метод формирования покрытий.

Материалы и методы

Нанесение модифицирующих покрытий производилось раствором методом и из газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым диспергированием политетрафторэтилена (PTFE, Sigma Aldrich), октенидина дигидрохлорида (OCD, TYBY 100289145.023-2016, Беларусь) в вакууме. Ранее OCD был синтезирован [1]. В качестве подложки использованы нетканые полимерные материалы AquaSpun с поверхностной плотностью 100 г/см², SpunBel — 40 г/см² («СветлогорскХимволокно», Беларусь).

Морфологию и элементный состав покрытий изучали на электронном микроскопе JEM-6000 (Jeol, Япония). Эффективность воздушной фильтрации (ЭВФ) определялась с помощью специально разработанной лабораторной установки [2]. Поверхностные свойства исходных и модифицированных образцов оценивали по краевому углу смачивания (КУС) водой при объеме капли 5,0 мкл. Антибактериальную активность образцов модифицированных PTFE, OCD, и исходного AquaSpun проводили в РНПЦГ в условиях прямого контакта со стандартизированными тест-культурами (*E. coli* ATCC 11229, *St. aureus* ATCC 6538, *Kl.pneumoniae* ATCC 13883) на поверхности агаровой среды в соответствии с международным стандартом [1].

Результаты и их обсуждение

Анализ морфологии покрытий методом СЭМ показал наличие тонкого слоя функционального покрытия PTFE на волокнах материалов, толщиной ~700 нм. Тонкопленочное покрытие из OCD включает в некоторых случаях отдельные кристаллы. Исходный нетканый материал AquaSpun обладает гидрофобными свойствами, с углом смачивания 121,4±2,5°. Модифицирование поверхности OCD понижает КУС материала с 121,4° до менее 5°. Нанесение на AquaSpun PTFE методом ЭЛД приводит к значительному увеличению КУС до 152,7±2,7°, ЭВФ с 78,3% до 83,4%. По-видимому, это связано с образованием механически устойчивого слоя на полипропиленовых волокнах. Модифицирование AquaSpun OCD значительно снижает ЭВФ с 78,3% до 52,4% за счет изменения морфологии и химического состава поверхности волокон, и его гидрофильных/гидрофобных свойств. Разработанная трехслойная система из слоев SpunBel+PTFE / PTFE+AquaSpun / SpunBel с ЭВФ 98,8±0,2 %.

Показано, что модификация AquaSpun OCD приводит к практически полному подавлению роста *E. coli*, *Kl. pneumoniae*, *St. aureus* с образованием зоны ингибирования 0,25-0,5 мм для *E. coli*, *Kl. pneumoniae*.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ X21УЗБГ-030, MRB-2021-548.

1. Рогачев А.А. Влияние плазмохимического модифицирования полипропиленовых волокнистых материалов на их фильтрационные свойства / Коронавирусная инфекция 2021: фундаментальные, клинические и эпидемиологические аспекты : сб. науч. материалов по итогам заседаний Респ. межведомств. Рабочей группы по преодолению COVID-19 / Нац. акад. Наук Беларуси, Отд-ние мед. наук ; под общ. ред. В. Г. Гусакова. – Минск : Беларуская навука, 2021. – С. 118- 129.
2. Avdeeva K. Modified polypropylene fibrous non-woven materials / K. Avdeeva, A. Shumskaya, A. Rogachev, M. Yarmolenko, A. Mikhalko, N. Dudchik, A. Oleynik // Conference: 2021 IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP) DOI:10.1109/NAP51885.2021.9568574

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГЕКСАДЕЦИЛТРИМЕТОКСИСИЛАНА

В.М. Акулова¹, А.Е. Соломянский¹, Г.Б. Мельникова², И.Г. Чишанков¹

¹Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; myfavoritecheese@mail.ru

²Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

Покрытия на основе кремнийорганических соединений эффективно используются в строительстве, промышленности, приборостроении защищая поверхности различного функционального назначения от воздействия влаги и загрязнений, а также от трения и изнашивания [1, 2]. В связи с этим, получение на металлических поверхностях гидрофобных покрытий на основе гексадецилтриметоксисилана (ГЕМС) представляет интерес [2].

Цель работы — сформировать покрытия на основе ГЕМС для повышения гидрофобности и износостойчивости стальной поверхности.

Материалы и методы. Материалом покрытий являлся продукт гидролиза ГЕМС (Sigma-Aldrich, степень чистоты $\geq 85,0\%$), проведенного в гексане, в присутствии концентрированной соляной кислоты. Высушенное вещество растворяли в тетрагидрофуране. Покрытия получали методом центрифугирования «spin coating» на подложках прямоугольной формы размером $1,5\text{ см}^2$ из стали марки 12Х17, вращающихся со скоростью 1800 и 4200 об/мин в течение 30 с при помощи высокоскоростной центрифуги ЦС01 (НПО «Центр», Беларусь).

Краевой угол смачивания (КУС) покрытий измеряли методом «неподвижной» капли дистиллированной воды объемом 3 мкл на приборе DSA100E (Kruss, Германия). Шероховатость образцов (R_a) оценивали на атомно-силовом микроскопе Nanoscope IIIA (Veeco Instrument, США). Условия сканирования: скорость — 3—5 Гц; стандартный кремниевый кантилевер с жесткостью 0,12 Н/м. Стабильность покрытий исследовали на трибометре возвратно-поступательного типа (ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси), при следующих условиях: приложенная нагрузка — 1,0 Н, индентор — стальной шарик диаметром 3,0 мм (сталь 95Х18), длина хода индентора — 3,0 мм, его линейная скорость — 4,0 мм/с. Тестирование образцов прекращали при достижении значений коэффициента трения (k_f) $\sim 0,5$ [3].

Результаты и их обсуждение. Поверхность стали без покрытия гидрофильна, значение КУС равно $82,0 \pm 0,2^\circ$. Для покрытий гидролизованного ГЕМС (г-ГЕМС) на стали, полученных при скоростях вращения 1800 и 4200 об/мин, значение КУС составляет $101,4 \pm 1,2^\circ$ и $108,6 \pm 1,4^\circ$ соответственно. Значение R_a для покрытия г-ГЕМС на стали, полученного при скорости вращения подложки 1800 об/мин, составляет 19,8 нм, а для покрытия,

сформированного при скорости вращения подложки 4200 об/мин — 7,9 нм, что подтверждает формирование более однородного покрытия при скорости вращения подложки 4200 об/мин.

Поверхность стали без покрытия выдерживает 4 цикла скольжения стального шарика, при этом значение k_f увеличивается с 0,2 до 0,5 (рис. 1, кривая 1). Наличие покрытия г-ГЕМС позволяет уменьшить значение k_f поверхности до $\sim 0,05$ (рис. 1). Покрытия г-ГЕМС на стали, полученные при скоростях 1800 и 4200 об/мин, выдерживают соответственно $116,0 \pm 24,0$ и $53,0 \pm 5,0$ циклов скольжения до достижения граничных условий трибоиспытаний. Таким образом, покрытие г-ГЕМС на стали, сформированное при скорости вращения подложки 1800 об/мин, образует менее однородное по толщине покрытие по сравнению с покрытием, полученным при скорости вращения подложки 4200 об/мин.

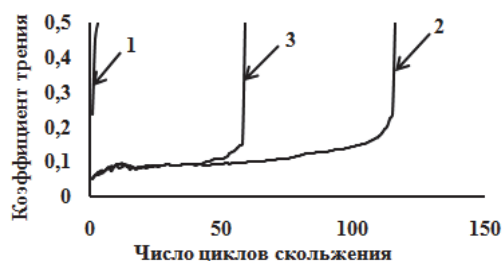


Рис 1. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения: поверхность стали (1); покрытия г-ГЕМС, полученные при скоростях вращения 1800 (2) и 4200 (3) об/мин.

Заключение. Показана возможность получения методом центрифугирования покрытий гидролизованного гексадецилтриметоксисилана на поверхности стали марки 12Х17, увеличивающих значение краевого угла смачивания водой с $82,0 \pm 0,2^\circ$ до $108,6 \pm 1,4^\circ$. При этом данные покрытия могут быть использованы для увеличения износостойкости прецизионных узлов трения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках договора № 2022-27-007 по гранту НАН Беларуси.

1. Зиновьева Т. В. Гидрофобные покрытия на основе 3-аминоэтиламинопропилтриметоксисилана // Инновации. Наука. Образование. — 2021, № 35, 153—161
2. Zhang L. [et.al.] Super-hydrophobicity and corrosion resistance of laser surface textured AISI 304 stainless steel decorated with Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) // Opt. — 2020(106146), 1—10
3. Sahoo R. and Biswas S. Frictional response of fatty acids on steel // J. Colloid Interface Sci. — 2009(333), 707—718

ПЛАСТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ С БОЛЬШИМИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Г. Колбая¹, А.В. Кузнецов², Д.А. Черников¹, В.В. Коврига³

¹ООО Группа «ПОЛИПЛАСТИК»,

²ГИПРО НИИ ГАЗ, Московский филиал,

³ООО «Группа ПОЛИМЕРТЕПЛО»,

Введение. Применение полиэтиленовых труб для газоснабжения обусловлено следующими оптимальными характеристиками: низкая газопроницаемость, коррозионная стойкость к внешней среде и транспортируемому газу, высокая эластичность и ударопрочность, широкий интервал рабочих температур от -20 до $+60$ °С, простота и надежность соединения, технологичность и экономичность. Однако длительная эксплуатация ПЭТ труб ведет к возникновению технологических трудностей, требующих решения [1]. Ранее при исследовании особенностей разрушения полиэтиленовых труб для газоснабжения было показано, что при одноосном и двуосном нагружении процесс разрушения в полиэтилене сопровождается возникновением локального сужения шейки. При этом, величины локального сужения близки по величинам для различных видов полиэтилена и составляют от 4 до 4,5 раз. Это значение характеризовалось как естественная кратность вытяжки. При этом, на различных видах полиэтилена фиксировались различные значения естественной кратности вытяжки (ЕКВ), некоторые различались в 2 раза [2].

Материалы и методы исследований. В настоящей работе оценка значений ЕКВ производилась на материале, который находился в газовой среде более 55 лет.

Результаты исследований и их обсуждение. В ходе испытаний на растяжение проявились обычно не наблюдающиеся факты увеличения относительного удлинения после длительного старения и рост значений ЕКВ. Дополнительные исследования геометрии зоны вытяжки позволило установить, что ЕКВ сформировалась в 2 этапа. Первоначально при растяжении на образце II типа по ГОСТ 11262, фор-

мировалась шейка с ЕКВ 4,5—4,6. А на втором этапе вытяжки значение ЕКВ строго остановилось на величине равной 7. Таким образом на одном и том же материале было продемонстрировано, что возникновение вытяжки может изменяться ступенчато, когда одна самоорганизующаяся система переходит в другую. При этом значение ЕКВ увеличиваются почти в 2 раза. Это говорит о том, что на превращение самоорганизующихся систем может существенно влиять содержание в системе серосодержащих продуктов.

Выводы. Естественным предположением к двухступенчатому формированию ЕКВ является то, что в материале труб, работающих в системе газоснабжения, на протяжении длительного периода накапливаются серосодержащие продукты из числа тех, которые являются отдушкой безопасности и материал после длительного срока эксплуатации может показывать большое содержание серы, которая накапливается естественным путём в процессе длительной эксплуатации и может способствовать реверсу показателя относительного удлинения, которое обычно уменьшается с увеличением периода старения, а при накоплении серы может увеличиваться до существенно больших значений [3]

1. Каргин В.Ю., Бухин В.Е., Вольнов Ю.Н. Полиэтиленовые газовые сети. Материалы для проектирования и строительства. Приволжск. кн. изд-во, 2001 – 400 с.
2. Щербина М.А. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико-механических наук Структура и фазовые превращения низкоразмерных самоорганизующихся систем различной симметрии
3. Колбая В.Г. Пластическое разрушение полиэтиленовых труб с различными сроками эксплуатации, Москва – 2017, С. 121

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ ДОПИРОВАННОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Е.М. Толстомятов, Л.А. Калинин, Л.Ф. Иванов, В.Ю. Шумская

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; etolstory@mail.ru

Процесс абляции политетрафторэтилена (ПТФЭ) излучением CO_2 лазера отличается уникальными характеристиками среди большинства термопластов [1, 2]. Совершенствование этого процесса с целью получения волокнисто-пористых фильтроматериалов требует знания механизма лазерной абляции, что является сложной задачей, обусловленной рекордной химической инертностью полимера и быстротечностью процесса его взаимодействия с лазерным излучением. Одним из методов исследования этого процесса является определение характеристик лазерной абляции (ЛА) ПТФЭ в условиях контакта с веществами, модифицирующими коэффициент поглощения ИК излучения, вязкость расплава, интенсивность образования газов и т.п., что возможно путём ЛА допированных мишеней.

Цель работы – изучение характеристик ЛА бинарных сплавов Ф-4 с Ф-4МБ, Ф-3 и канифолью.

Материалы и методы. Порошкообразные компоненты смешивались миксером, на завершающем этапе — с добавлением гексана или этанола с целью облегчения диспергирования агломератов частиц порошков. 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 24 МПа. Термообработка производилась по типовым температурно-временным режимам монолитизации ПТФЭ. Абляция проводилась лучом лазера мощностью 40—45 Вт в камере ВУП-4 при непрерывной откачке.

Результаты и их обсуждение. Основной отличительной особенностью ЛА ПТФЭ является образование наряду с газообразной также волокнистой фракции. На рис. 1 приведена зависимость выхода волокнистой фракции от содержания Ф-4МБ в сплаве.

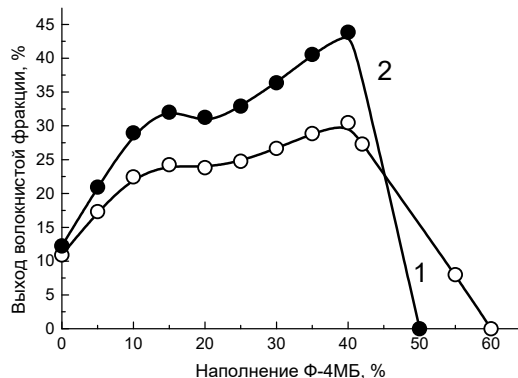


Рис. 1. Зависимость выхода волокнистой фракции от содержания Ф-4МБ

Максимальное значение выхода волокнистой фракции Ф-4, допированного Ф-4МБ, достигается при 40 % (около 30 %); ещё более высокий максимум у мишени с дополнительной добавкой низкомолекулярного ПТФЭ — около 44 % (график 2 на рис.1). При концентрации допанта выше 40 % выход волокон резко снижается, вместо них в абляционный поток выбрасывается микрокапельная фракция.

Для бинарных сплавов Ф-4–канифоль и Ф-4–Ф-3 результаты получены для одной концентрации допанта — 0,15 и 1 %, соответственно (до термообработки, после спекания концентрация изменилась). Выход волокнистой фракции у сплава с Ф-3 повысился значительно — до 21 %, что в 2 раза выше, чем у чистого Ф-4 из полимера той же партии и полученного при тех же режимах монолитизации. Интересно отметить, что сплав той же концентрации, но полученный при сухом смешении, показал выход волокнистой фракции лишь около 6 %.

Выход волокнистой фракции сплава с канифолью оказался ещё ниже — около 3 %.

Заключение. Полученными результатами подтвержден ранее сделанный вывод, что основными факторами, определяющими волокнообразование при абляции ПТФЭ и сплавов на его основе излучением CO_2 лазера, являются вязкость расплава (возможно, низковязкого его компонента) и коэффициент поглощения излучения, определяющий температурный профиль по глубине мишени. Влияние последнего фактора продемонстрировано на образцах, допированных канифолью, которая разлагается при температуре выше 300 °С с образованием карбонизированных микрочастиц, повышающих коэффициент поглощения излучения.

Необходимо также отметить, что сделанные выводы справедливы только для использованных режимов лазерного облучения. Изменение интенсивности излучения и облучение в импульсном или квазиимпульсном режимах, как показано в ранее выполненных экспериментах, приводит к качественно отличающимся результатам.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» зад. 2.44 и ГПНИ «Многофункциональные и композиционные материалы» ПП 8.4 зад. 4.2.2 НИРЗ.

1. Grakovich P.N., Ivanov L.F., Kalinin L.A., Ryabchenko I.L., Tolstopyatov E.M., Krasovskii A.M. Laser ablation of polytetrafluoroethylene // Russ. J. General Chem. — 2009 (79), No. 3, 626—634
2. Толстомятов Е.М. Лазерная абляция полимеров (обзор) // Полимеры и композиты. — 2016 (2), № 1, 6—20

УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТОГО ФТОРОПЛАСТА «ГРИФТЕКС»

П.Н. Гракович¹, Я.А. Ковалёва¹, Т.Ф. Кузнецова²

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; yara.kov@tut.by

²Государственное научное учреждение «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

Уникальность свойств политетрафторэтилена (ПТФЭ, фторопласт-4) ограничивает количество методов его изучения. Это же относится волокнисто-пористому фторопласту «Грифтекс», получаемому методом лазерной абляции [1, 2]

Цель. Оценить возможность использования метода низкотемпературной ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) адсорбции — десорбции азота для изучения материала «Грифтекс».

Материалы и методы исследования. Использован волокнисто-пористый материал (ВПМ) «Грифтекс», полученный в разных условиях лазерной абляции, в т.ч. в присутствии плазмы ВЧ-разряда (ВЧР), с добавлением в ПТФЭ 5% фторопласта марки Ф-4МБ или предварительным облучением его γ -излучением (80 Гр)

Низкотемпературная адсорбция-десорбция одноточечным (single point) и многоточечным методом БЭТ ($A_{\text{сп}}$, $A_{\text{вбт}}$) была осуществлена на анализаторе поверхности и пористости ASAP 2020 MP (Micromeritics, US) [3].

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 представлены значения удельной поверхности различных образцов ВПМ «Грифтекс», рассчитанные из изотерм низкотемпературной физической адсорбции-десорбции азота.

Установлено, ВПМ «Грифтекс» имеет огромную удельную поверхность, в 10—100 раз превышающую это значение для других полимерных волокнисто-пористых материалов. Удельная поверхность сильно зависит от условий лазерной абляции и предварительной модификации ПТФЭ. В то же время наличие плазмы ВЧР практически не оказывает влияния на неё.

Все образцы имеют очень небольшой объем мезопор, внутри которого происходит мезопоровая конденсация адсорбата. Измеренные изотермы физической сорбции азота доказывают, что семь образцов модифицированного ПТФЭ явно отличаются один от другого в зависимости от условий получе-

ния. Об этом свидетельствует и изменение значений энергетической константы C от 7 до 21, позволяющее оценить формирование адсорбционных слоев (монослоя и полимолекулярного слоя) при некотором промежуточном относительном давлении с последующей капиллярной конденсацией и образованием жидкой фазы. При значениях $C > 9$ адсорбция азота в точке перегиба превышает монослойное заполнение по БЭТ (обр. 2—6). Для $C < 9$ $A_{\text{сп}}$ и $A_{\text{вбт}}$ расходятся все больше (обр. 1, 7), что говорит об изменении процесса сорбции и десорбции азота на фторопласте.

Таблица 1. Изменение удельной поверхности и константы C образцов модифицированного ПТФЭ в зависимости от условий получения

№	Удельная мощность лазерного излучения, наличие плазмы, предварительная γ -обработка или введение Ф-4МБ	Уд. поверхность (single point) $A_{\text{сп}}$, м ² /г	Уд. поверхность (метод БЭТ) $A_{\text{вбт}}$, м ² /г	Энергетическая константа C
1	50 Вт/см ²	4,4	6,8	7
2	500 Вт/см ²	2,7	3,4	14
3	500 Вт/см ² + ВЧР	2,6	3,1	21
4	500 Вт/см ² + γ	3,2	4,1	14
5	500 Вт/см ² + γ + ВЧР	3,4	4,2	19
6	500 Вт/см ² + Ф-4МБ	3,4	4,4	14
7	500 Вт/см ² + Ф-4МБ + ВЧР	3,1	4,5	8

Выводы. Показана перспективность использования изотерм низкотемпературной физической адсорбции-десорбции азота для изучения продуктов лазерной абляции ПТФЭ

1. Красовский А.М., Толстопопов Е.М. // 10-я науч.-технич. конфер. «Физика и механика композиционных материалов на основе полимеров». Тез. докл. Гомель. — 1981, 4.
2. Красовский А.М., Толстопопов Е.М. // Поверхность. Физика, химия, механика. — 1985. - №1. — с. 143-149.
3. IUPAC // Pure Appl. Chem. 2015. V. 87, №9-10. P. 1051.
4. Gregg S. J., Sing K.S. W. Adsorption, Surface Area and Porosity. 2nd ed. London: Academic Press, 1982. 304 p.

МОНИТОРИНГ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.В. Кожушко, В.П. Сергиенко, А.Я. Григорьев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vkozhushko@mpri.org.by

Введение. Качество адгезионных соединений металлополимерных систем определяет прочность конструкций. Актуальным является решение задач контроля процесса полимеризации ультразвуковыми методами с применением лазерных источников [1].

Цель работы — проведение мониторинга процесса полимеризации эпоксидной смолы по результатам серии измерений времени пробега ультразвука, возбуждённого оптико-акустическим (ОА) методом, в слоистых металлополимерных структурах.

Материалы и методы. Объектом исследования является сэндвич-структура из двух алюминиевых пластин, соединённых слоем эпоксидной смолы. Процесс полимеризации эпоксидной смолы сопровождается изменением вязкоупругих свойств и переходом из жидкого в твёрдое состояние, что вызывает увеличение акустических упругих модулей и импеданса материала. Определение изменений характеристик смолы в течение полимеризации возможно по времени пробега ультразвуковых импульсов. С этой целью предложена схема (ОА) преобразования, в которой лазерное излучение наносекундной длительности освещает сэндвич-структуру. В результате возбуждаются зондирующие импульсы давления, распространяющиеся к тыльной стороне, где происходит регистрация ультразвука широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем на основе поляризованной плёнки поливинилиденфторида (ПВДФ) толщиной 25 мкм. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

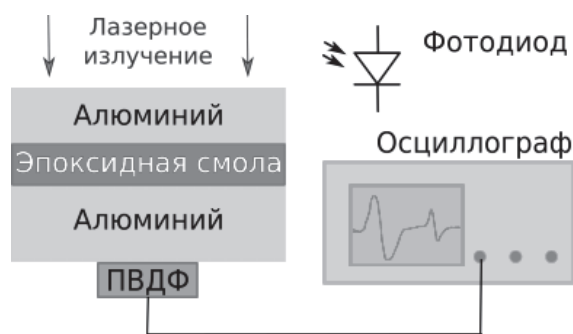


Рис. 1. Схема измерения времени пробега ультразвукового импульса через металлополимерную слоистую структуру

Диаметр лазерного пятна равен 5 мм, диаметр чувствительного элемента преобразователя — 3 мм, что позволяет пренебречь влиянием дифракции.

Результаты и их обсуждение. Особенностью рассматриваемой схемы является бесконтактное возбуждение широкополосных ультразвуковых импульсов в результате ОА преобразования на свободной алюминиевой поверхности. Расчёты показывают, что эффективность ОА преобразования на границе воздуха и алюминиевой поверхности имеет порядок $0,1 \text{ Па}/(\text{Вт}/\text{см}^2)$. Следовательно, лазерные импульсы длительностью 10 нс с энергией 10 мДж при диаметре пятна на алюминиевой поверхности 5 мм возбуждают импульсы давления с пиковым значением 0,5 МПа. Форма возбуждаемых акустических импульсов имеет выраженную фазу сжатия, а длительность сопоставима с длительностью лазерного импульса, что позволяет охватить широкую рабочую полосу частот от 100 кГц до 50 МГц, пространственная протяжённость ультразвукового импульса составляет приблизительно 150 мкм.

Акустический импеданс алюминия больше импеданса смолы и при прохождении через границы раздела алюминий-смола часть энергии импульса отражается, что приводит к изменению амплитуды волны согласно выражениям для коэффициентов отражения R и пропускания T :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (1)$$

где Z_1 и Z_2 акустические импедансы материалов; индекс показывает, что акустический импульс распространяется из первой среды во вторую.

Заключение. В процессе сшивания полимерных цепочек эпоксидной смолы её жёсткость увеличивается, что отражается на вязкоупругих свойствах и, как следствие, приводит к уменьшению поглощения ультразвука в смоле, а также снижению потерь на отражение при прохождении границ раздела. В результате последовательно проведённых измерений показана возможность мониторинга степени полимеризации смолы по изменению амплитуды ультразвуковых импульсов и времени их пробега.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке по программе БРФФИ-МИРРУ договор № T22УЗБ-069.

1. Zhang Y. et al. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic // Measurement. — 2020 (158), 107737. doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107737

РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ С СОДЕРЖАНИЕМ ХРОМА 1%, 3% И 5% НА УСТАНОВКЕ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

Ю.И. Попкова

Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», Гомель, Беларусь; u.popkova@beloil.by

Введение. В настоящее время большинство месторождений РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» находятся на поздней стадии разработки, для которой характерна высокая обводненность продукции скважин. Основной задачей в таких условиях является поиск инженерных решений, направленных на предупреждение коррозии подземного оборудования скважин в процессе добычи нефти. Внедрение ингибиторов коррозии позволило исключить отказы в работе скважин по причине негерметичности насосно-компрессорных труб, увеличив межремонтный период, однако высокая стоимость нефтехимии вызвала необходимость поиска альтернативных технологий — применение низко- и среднелегированных сталей.

Цель: на основании стендовых испытаний подобрать стали насосно-компрессорных труб, обладающие повышенной коррозионной стойкостью в условиях добывающих скважин РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», осложненных коррозией, и одновременно экономически более выгодные в сравнении с ингибиторной защитой.

Материалы и методы. Стендовые испытания для определения коррозионной стойкости трубных сталей с содержанием хрома 1%, 3% и 5% проводились на установке, моделирующей условия эксплуатации добывающих скважин месторождений Беларуси, при температуре 70 °С и давлении 150 бар, что соответствует скважинным условиям скважин. Схема установки приведена на рисунке 1. Для проведения испытаний из трубных сталей изготавливались образцы-свидетели коррозии, которые после испытаний и определения скорости коррозии, дополнительно исследовались в специализированной металлографической лаборатории.

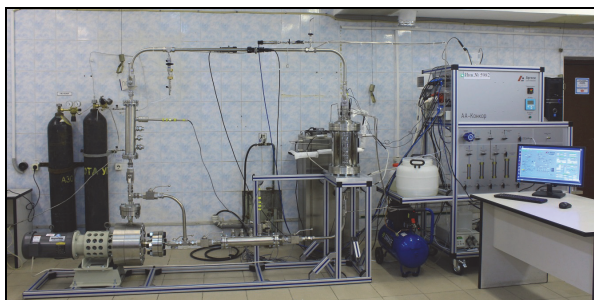


Рисунок 1 – Схема установки «АА-КОНКОР»

Результаты и их обсуждение. Стендовые испытания проведены для условий трех коррозионно-агрессивных сред различного химического состава, в которых подземное оборудование добывающих скважин месторождений Беларуси наиболее подвержено коррозионному воздействию, при разных скоростях потока, соответствующих дебитам добываемой жидкости, в условиях высокой температуры и высокого давления. Кроме определения скорости коррозии в конкретных условиях, проведено исследование морфологии поверхности и глубины проникновения коррозии на поперечных микрошлифах образцов-свидетелей коррозии после проведенных испытаний, что позволило определить, какие из испытуемых марок трубных сталей подвержены сплошной коррозии, какие — локальной. Данные результаты являются достаточно важными для последующего промышленного внедрения. Сплошная коррозия — наименее опасный вид коррозии, так как трубная сталь, из которой изготовлены насосно-компрессорные трубы, незначительно теряет свои свойства в то время, как локальная достаточно быстро может приводить к сквозным повреждениям и соответственно, преждевременным подъемам подземного оборудования скважин. Стендовые испытания низко- и среднелегированных сталей позволили сократить временные и финансовые затраты на промысловые испытания.

В результате проведенной работы получены данные о стойкости к коррозии трубных сталей насосно-компрессорных труб с содержанием хрома 1%, 3% и 5% в условиях высокой минерализации скважинной продукции 200 – 300 г/л, содержащей растворенный углекислый газ в концентрации 30—40 мг/л, при скоростях потока скважинной жидкости 0,2, 0,3 и 0,6 м/с в условиях высокой температуры (70 °С) и высокого давления (150 бар), которые могут быть использованы при выборе марок трубных сталей для аналогичных условий зарубежными компаниями.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка методологии подбора антикоррозионных материалов для подземного оборудования добывающих и нагнетательных скважин месторождений НГДУ «Речицанефть» на основании стендовых испытаний, моделирующих промысловые условия, договор №35.2019-2021.

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОГЕЛЕЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ КАРБОКСИЛИРОВАННОГО ПОЛИАКРИЛАМИДА С ИОНАМИ Cu(II)

Д.Л. Кудрявский¹, Е.К. Фомина¹, И.Н. Попенкова², И.А. Климовцова¹, Е.В. Гринюк¹

¹Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь;
kudryavsky@bsu.by

²Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь

Введение. Комплексы ионов металлов с водорастворимыми полимерами могут применяться в водоподготовке, биомедицине, нефтедобыче. Применение часто основывается на явлении гелеобразования при смешивании водорастворимых полимеров и ионов комплексообразователей. В частности, гелеобразование карбоксилированного полиакриламида (КПАА) с ионами металлов высокой валентности широко изучено для применения с целью повышения нефтеотдачи пластов [1]. Получено множество фазовых диаграмм, описывающих комплексообразование ионов двухвалентных металлов с природными полимерами либо КПАА с ионами металлов более высокой валентности. На фазовых диаграммах наблюдалась четко определенная область гелеобразования между областями растворов и фазового разделения. Гелеобразование объясняется комплексообразованием иона с функциональными группами различных полимерных цепей. При этом порог гелеобразования связан с концентрацией образования флуктуационной сетки зацеплений, а фазовое разделение является результатом синерезиса геля, когда плотность сшивки становится выше плотности запутывания [2]. При комплексообразовании КПАА с ионами двухвалентных металлов тенденция к гелеобразованию выражена существенно слабее [2].

Цель работы — определение области концентраций полимера и мольных отношений компонентов, при которых возможно формирование гидрогелей КПАА с ионами Cu(II) .

Материалы и методы. Использовался КПАА, содержащийся в промышленном препарате ВРП-3 (ОАО «Лесохимик», Борисов) со средневязкостной молекулярной массой $(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^5$ и мольной долей акрилатных звеньев 0,81. Концентрация образования флуктуационной сетки зацеплений определялась методом ротационной вискозиметрии водных растворов на ротационном реометре Rheotest RN 5.1. Для исследования растворимости комплексов Cu(II) с КПАА смешивали равные объемы водных растворов КПАА и сульфата Cu(II) с концентрацией вдвое выше требуемой. Растворимость оценивали при помощи фильтрования под вакуумом на бумажном фильтре.

Результаты и их обсуждение. Для водных растворов применяемого КПАА концентрация образования флуктуационной сетки зацеплений составила 8 мас. % (рис. 1).

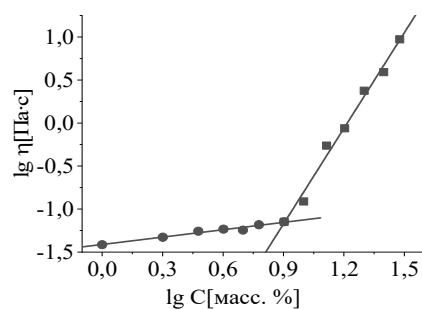


Рис. 1. Зависимость логарифма динамической вязкости водных растворов КПАА от логарифма концентрации

При концентрациях КПАА ниже концентрации образования флуктуационной сетки зацеплений наблюдается фазовое разделение в системах, в которых мольные отношения $\text{Cu(II)} : \text{COO}^-$ (КПАА) составляют не менее 1 : 3 (рис. 2). При этом формируются гидрофобные осадки, не растворимые и не набухающие в избытке воды.

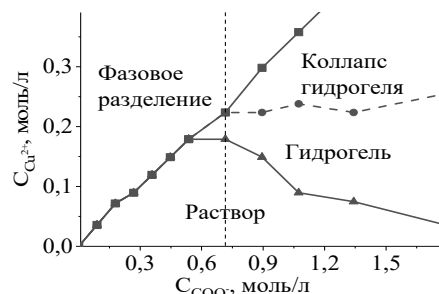


Рис. 2. Диаграмма растворимости системы водный раствор КПАА – сульфат Cu(II)

Растворы КПАА с концентрацией выше концентрации образования флуктуационной сетки зацеплений способны формировать гидрогели с ионами Cu(II) в определенной области мольных отношений $\text{Cu(II)} : \text{COO}^-$ (КПАА) (рис. 2). При этом максимальное значение мольных отношений $\text{Cu(II)} : \text{COO}^-$, при которых наблюдается формирование гидрогелей, возрастает с увеличением концентрации КПАА. Степень набухания полученных гидрогелей в дистиллированной воде составляет 60—1200 г/г.

- Oikonomou E. K., Lezi N., Bokias G., Kallitsis J. K., Iliopoulos I. Time-dependent Cu^{2+} -induced gelation of poly(ethylene-alt-maleic acid) in aqueous solution // *Eur. Polym. J.* — 2009 (**45**), 3426—3432
- Axelos M. A. V., Mestdagh M. M., Francois J. Phase diagrams of aqueous solutions of polycarboxylates in presence of divalent cations // *Macromolecules.* — 1994 (**27**), 6594—6602.

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ
ЛИПОПРОТЕИНОВ КРОВИ КРЫСИ.А. Никитина¹, И.А. Челнокова², М.Н. Стародубцева^{1,2}¹ УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь; nikkitina@gmail.com² Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Актуальность. Липопротеины (ЛП) плазмы крови, являясь центральным элементом липидного обмена, в условиях нарушения их метаболизма способны стимулировать атеросклеротические процессы и вызывать развитие метаболического синдрома [1]. Одним из факторов, способных запустить атерогенез, является увеличение в составе ЛП продуктов перекисного окисления липидов, которые, как известно, нарушают физиологические функции этих частиц посредством изменения структуры их поверхности. В связи с этим, параметры структурно-механических свойств поверхности ЛП можно использовать как количественные маркеры их состояния. К факторам, вызывающим изменения в структуре белков и липидов ЛП частиц, относятся действие различных видов ионизирующих излучений, в том числе и рентгеновского. В качестве инструментов анализа морфологических и структурно-механических особенностей ЛП частиц хорошо подходят методы атомно силовой микроскопии (АСМ). Они сочетают в себе высокое пространственное разрешение с хорошей чувствительностью к силам, действующим на уровне атомов. Это позволяет эффективно исследовать механические свойства биологических объектов в физиологических условиях.

Целью работы стал анализ изменений упругих свойств поверхности ЛП частиц в ответ на действие рентгеновского излучения.

Материалы и методы. До включения в эксперимент белых лабораторных крыс-самцов содержали на диете с высоким содержанием холестерина в течение трёх месяцев. Кровь данных животных облучали на рентгеновском аппарате X-Rad 320 Precision X-ray в дозах 1 и 100 Гр. ЛП выделяли методом ультрацентрифугирования в градиенте плотности бромида калия (плотность раствора 1,063 г/л). Сканирование образца с ЛП на слюде, модифицированной полилизинном, проводили в фосфатно-солевом буфере с помощью атомно-силового микроскопа Bio-ScopeResolve (Bruker, США) в режиме записи Peak-Force QNM in Fluid иглой-зондом SCANASYST-FLUID⁺ с радиусом закругления 2 нм, с жёсткостью 0,4 Н/м. Анализировали параметры топографических изображений и карт модуля упругости (E).

Результаты и их обсуждение

Анализ данных показал, что диаметр адгезированных на слюде ЛП частиц крови крыс, содержащихся на диете с высоким содержанием холесте-

ла, составляет порядка 70 нм. Для оценки формы ЛП рассчитано отношение диаметра частицы к ее высоте (таблица 1). При действии рентгеновского излучения в дозе 1 и 100 Гр происходит уменьшение данного отношения. Это указывает на изменение формы ЛП частиц, подвергшихся воздействию рентгеновского облучения – частица при адгезии становится более плоской. Одновременно с этим действие рентгеновского облучения приводит к почти двукратному увеличению объема исследуемых ЛП частиц (таблица 1).

Таблица 1. Параметры липопротеинов крови крысы в контроле и после облучения рентгеновским излучением

Параметр	Липопротеины		
	Контроль	1 Гр	100 Гр
D/h	<u>7,7</u> 6,6-9,4	<u>5,9*</u> 5,1-7,6	<u>5,4*</u> 4,9-6,7
V, нм ³ × 10 ⁴	<u>2,45 1,67-</u> <u>3,55</u>	<u>4,46*,**</u> <u>2,90-5,85</u>	<u>2,31</u> <u>1,96-3,78</u>
E, МПа	<u>7,8</u> 4,87-12,06	<u>3,3*</u> 2,13-5,02	<u>9,29</u> 6,0-17,0

Примечание – Над чертой медиана, под чертой – (нижний квартиль - верхний квартиль);

* – Различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром контрольного образца, критерий Манна-Уитни (p < 0,05);

** – Различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром контроля и другой дозой облучения, критерий Манна-Уитни (p < 0,05).

Рентгеновское излучение в дозе 1 и 100 Гр оказывает влияние не только на ряд морфологических характеристик ЛП частиц, но и на величину модуля упругости (E). Так, средний модуль упругости исследуемых ЛП частиц равен 7,8 МПа. (таблица 1). Действие излучения в дозе 1 Гр приводит к уменьшению модуля упругости более чем в два раза, а воздействие дозы 100 Гр изменений по сравнению с контролем не вызывает.

Заключение. Впервые выявлены индуцированные рентгеновским излучением изменения параметров морфологии и упругих свойств липопротеидных частиц плазмы крови крыс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Б20Р-427 2020-2022 гг.).

1. Illingworth, D.R. Lipoprotein metabolism / D.R. Illingworth // American Journal of Kidney Diseases: The Official Journal of the National Kidney Foundation. – 1993. – Т. 22. – № 1. – С. 90-97.

АКТИВАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ

А.А. Павлов^{1*}, А.М. Камалов¹, М.Э. Борисова¹, К.В. Малафеев², В.Е. Юдин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;
*pavlov.aa.hv@mail.ru

²Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Введение. На сегодняшний день полимерные материалы являются неотъемлемой частью нашей жизни. Проблема утилизации полиолефинов может быть решена с переходом на биоразлагающиеся аналоги.

Полилактид — биоразлагающийся, биосовместимый полимер, мономером которого является молочная кислота; применяется в упаковочных материалах и в медицине.

Сегодня многие исследования направлены на создание «активных упаковок», повышающих срок хранения продуктов. В полимерных материалах является возможным сформировать устойчивое электретное состояние, которое наделяет материал бактерицидными свойствами.

Исходный полилактид имеет слабо выраженные электретные свойства. С целью повышения устойчивости электретного состояния, в полилактид были добавлены углеродные нановолокна (VGCF).

Цель работы — определить оптимальное процентное содержание наполнителя, обеспечивающее длительное сохранение заряда.

Материалы и методы. Объектом исследования является композиционный материал на основе полилактида (PURAC, 100% L-лактид). В качестве наполнителей использованы углеродные нановолокна (VGCF). Процентное содержание наполнителя варьировалось от 0,5 до 5%.

Образцы заряжались в коронном разряде в течение 60 секунд при комнатной температуре. Электретная разность потенциалов была измерена методом компенсации с вибрирующим электродом [1].

В полимерных диэлектриках существует два основных механизма релаксации заряда: за счет собственной проводимости и за счет освобождения носителей заряда с ловушек. Предполагая, что релаксация заряда происходит за счет собственной проводимости композита, можно рассчитать ее значение γ по формуле, приведенной в [2]. Используя теорию дисперсионного транспорта ($\gamma=0$) [2], можно получить зависимость подвижности носителей от времени $\mu(t)$. Полученные данные позволяют определить преобладающий механизм релаксации.

Результаты и обсуждение. На рис. 1. приведены зависимости электретной разности потенциалов образцов с различным содержанием углеродных нановолокон (VGCF) от времени. Образец с 0,5% VGCF сохраняет заряд дольше остальных.

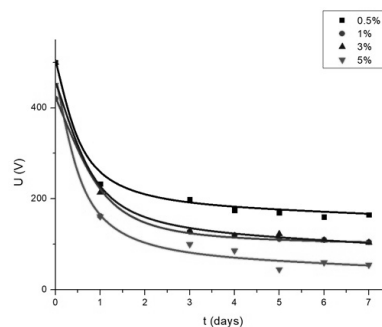


Рис. 1. Зависимости электретной разности потенциалов образцов с VGCF от времени

Используя данные из рис. 1, можно построить графики зависимостей $\gamma(t)$ и $\mu(t)$ для образца с 0,5% VGCF.

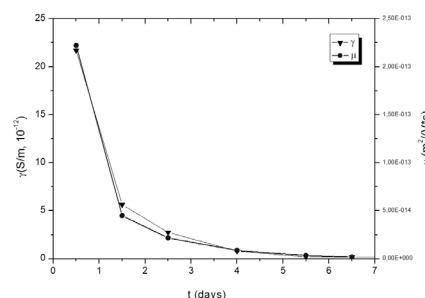


Рис. 2. Зависимости подвижности носителей заряда и проводимости от времени

Зависимость $\gamma(t)$ пропорциональна $\mu(t)$ согласно выражению (1)

$$\gamma = \text{период} \quad (1)$$

Можно сделать вывод, что релаксация заряда в композите происходит в соответствии с теорией дисперсионного транспорта.

Таким образом, определено оптимальное процентное содержание наполнителя, обеспечивающее стабильное электретное состояние, и механизм релаксации заряда.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-4346.2022.4.

- Борисова М. Е., Койков С. Н. Физика диэлектриков. — Л.: ЛГУ. — 1979
- Борисова М. Е. Физика диэлектриков. Физические основы активных диэлектриков. — С-Пб.: СПбПУ. — 2014

СТРУКТУРА МИКРОВОЛОКОННОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА, ПРОШЕДШЕГО ЭКСПЛУАТАЦИЮ В ФИЛЬТРЕ-СЕПАРАТОРЕ СЫРОГО ГАЗА

В.Ю. Гарбарук¹, В.А. Гольдаде²

¹ОДО «НТЦ Ларта», Гомель, Беларусь; v.garbaruk@outlook.com

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Очистка рабочих сред от твердотельных включений является неотъемлемой частью технологического процесса, позволяющей многократно увеличить ресурс и улучшить эффективность используемого оборудования. Наиболее часто для этих целей используют устройства, включающие в качестве фильтрующей среды микроволокнистые материалы различной природы. Одной из главных целей при проектировании фильтрующих элементов является сохранение их низкого сопротивления потоку среды на протяжении всего процесса эксплуатации, для чего используют комбинации нескольких видов волокон, выполняющих разные функции и синергично улучшающих работу очищающего устройства.

Цель работы — изучение и анализ внутренней структуры образца фильтрующего элемента, прошедшего эксплуатацию на компрессорной станции магистрального газопровода в составе фильтра-сепаратора.

Образец представляет собой цилиндрический фильтрующий элемент с двумя перфорированными опорными каркасами и гофрированным фильтрующим слоем площадью 2,4 м², осуществляющим очистку в направлении «изнутри-наружу». Задержанное загрязнение массой порядка 900 г представляет собой твердые частицы размером от 1 мкм и больше, состоящие преимущественно из оксидов железа, кремния и алюминия.

Фильтрующий элемент состоит из защитного полипропиленового материала типа «*spunbond*», также выполняющего роль префильтра, первичного фильтрующего слоя из полипропиленовых микроволокон, полученных по технологии *melt blowing* (аэродинамического распыления расплава), а также определяющего номинальную толщину фильтрации в 1 мкм слоя из композитной боросиликатной стеклоткани и дренажного слоя из нетканого полиэфирного материала.

Наличие в структуре фильтрующего элемента градиента размеров волокон и пористости позволяет осуществлять глубинную фильтрацию, что обуславливает послойное увеличение степени очистки фильтруемой среды и уменьшение среднего размера задержанных частиц загрязнения.

Наибольшее загрязнение характерно для префильтра и первого фильтрующего слоя, полностью изменивших окраску и содержащих более 97% задержанных частиц загрязнения (рис. 1). Последующий слой стеклоткани имеет механические включения с внутренней стороны, которые локализованы в слое, не превышающем 25% толщины материала (рис. 2).



Рис. 1. Структура первичного фильтрующего слоя с задержанными частицами загрязнения

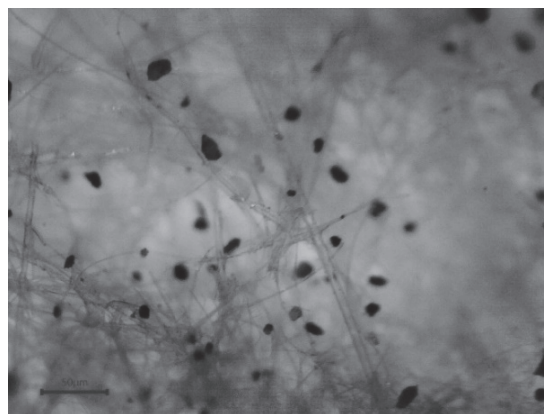


Рис. 2. Структура поверхности стеклоткани

Увеличившийся в процессе загрязнения перепад давления на фильтрующем элементе привел к уплотнению фильтрующих материалов и соответствующему снижению пористости, отразившемуся на уменьшении тонкости фильтрации каждого отдельного слоя.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о соответствии комбинации фильтрующих материалов конкретным условиям эксплуатации и заложенным свойствам: градиентная структура позволила исключить запыление частицами загрязнений высокоэффективных фильтрующих слоев и последующее резкое увеличение сопротивления потоку. Изменение пористости материалов в процессе эксплуатации также является существенным фактором, который влияет на ресурс и задерживающую способность фильтроэлемента, и поэтому должно быть учтено при проектировании устройств фильтрации.

РАЗРАБОТКА ГРАДИЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ШУМОВЫХ ЭКРАНОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В.П. Сергиенко¹, С.Н. Бухаров¹, В.В. Кожушко¹, А.С. Тулейко¹, А. Алексиев²

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; sbuharov@mpri.org.by

² Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария; alexiev@imbm.bas.bg

Введение. Одним из важнейших средств снижения шума, получивших широкое распространение в градостроительной практике, являются шумозащитные экраны. Преимущества шумозащитных экранов включают простоту их возведения и эксплуатации, относительно небольшой вес при достаточно высоких шумозащитных характеристиках. Акустическая эффективность экранов во многом определяется применяемыми в них материалами. Как правило, необходимые акустические характеристики шумозащитного экрана достигаются путем создания многослойной конструкции, включающей звукопоглощающие и звукоизолирующие слои заданной толщины и расположенные в определенном порядке. В полимерной отрасли достаточно недавно возникло новое направление градиентных композиционных материалов. Формирование градиента в композиционных материалах позволяет получить плавное изменение различных, в том числе, акустических свойств в пределах одного материала в заданном направлении. Таким образом, создание эффективных акустических материалов, способствующих снижению уровней нежелательного транспортного и промышленного шума, является актуальным направлением исследований.

Цель работы – создание акустических градиентных композитов на основе полимерных связующих и природных наполнителей, сочетающих одновременно высокие характеристики звукопоглощения и звукоизоляции для применения в конструкциях шумозащитных экранов автомобильных и железных дорог.

Материалы и методы. В качестве природного наполнителя выбрана гречневая лузга плотностью менее 150 кг/м³. В качестве связующего для композитов использовали эпоксидную смолу в исходном немодифицированном состоянии, а также модифицированную смесь. В качестве модификаторов полимерного связующего использовали стеарат кальция и графит с массовой долей не более 7%. Более подробное обоснование данного выбора полимерного и природного компонентов представлено в работах [1, 2]. Структура композита на основе гречневой лузги и модифицированной эпоксидной смолы представлена на рис. 1. Измерения коэффициента звукопоглощения проведены по стандарту ISO 13472-2-2010. Измерения показателей звукоизоляция

(потерь при передаче звука) проводили по стандарту ASTM E2611-19.

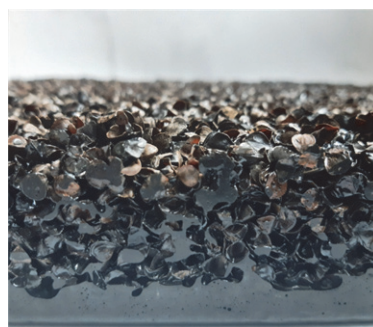


Рис. 1. Структура акустического композита на основе гречневой лузги и модифицированной эпоксидной смолы

Результаты и их обсуждение. Акустические характеристики композита оптимизированы на основе измерений реального спектра шума, возникающего при торможении отцепов (вагонов) на территории сортировочно-отправочного парка-С станции Гомель. Разработанный градиентный материал характеризуется нормальным коэффициентом звукопоглощения 0,6—1,0 и абсолютным значением звукоизоляции более 60 дБ в диапазоне частот 50—6400 Гц. Применение таких композитов в конструкциях шумозащитных экранов для автомобильных и железных дорог может обеспечивать снижение уровней шума до действующих нормативных уровней. Дополнительными преимуществами разработанного композита являются относительно низкая плотность, экологичность и доступность природного компонента (гречневой лузги).

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке программы *Science for Peace and Security Programme*, грант SPS G5790.

1. Kozhushko, V.V. Buckwheat husk and epoxy resin based composites for noise abating // V.V. Kozhushko, S.N. Bukharov, A. Alexiev, R. Iankov // *Journal Akustika*. – Vol. 40. – 2021. – P. 17-20.
2. Бухаров, С.Н. Звукопоглощение и звукоизоляция акустических композитов на основе гречневой лузги и модифицированной эпоксидной смолы / С.Н. Бухаров, В.В. Кожушко, В.П. Сергиенко, А.С. Тулейко, Р. Янков, А. Алексиев, М. Датчева // *Полимерные материалы и технологии* – 2021, Т.7, №. 4. – С. 33–38.

ХИМИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. Назарович, О.В. Рева, Я.В. Харак

ГУО УГЗ МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь; volha107@rambler.

Введение. Химическая металлизация диэлектрических материалов является одним из перспективных способов получения светоотражающих электропроводных слоев для совершенствования защитной одежды, наиболее функциональными из которых представляются системы на основе Ni. Все известные методы химической металлизации диэлектриков включают несколько последовательных стадий обработки в растворах [1, 2], условия которых определяют морфологию покрытий, от которой, в свою очередь, зависят многие функциональные свойства слоев металла. Зародыши никеля обладают способностью к двумерному росту в плоскости подложки, что приводит к росту пластинчатых кристаллов [1—4]. На дальнейших стадиях происходит перекрывание первичных зародышей, их рекристаллизация и рост в направлении, перпендикулярном подложке. Влияние температуры растворов, pH, природы и концентрации лигандов, ПАВ, природы подложки и способа ее активации на морфологию покрытий в комплексе, их фазовый состав, микротвердость, износостойкость и др. нелинейно и очень плохо прогнозируемо. Химическое осаждение металлических слоев на текстильные подложки перспективно только в случае высокой инертности материала. Данному условию отвечают полиэфирные и кремнеземные полотна, стекло- и углеткани, химическая металлизация которых в литературе практически не описана.

Результаты и обсуждение. Установлено, что в растворах никелирования любого комплексного состава скорость осаждения пленок Ni-P на поверхности как полиэфирной, так и силикатной ткани возрастает в 2—3 раза по сравнению с гладкими диэлектриками. Причиной, очевидно, является значительно большая адсорбция коллоидных частиц активизирующих соединений кремния, олова и палладия на очень развитой поверхности ткани: так, на гладком стекле к 2,5 мин осаждения толщина слоя металла достигает ~0,5 мкм, а на стеклоткани - 2,9 мкм. На поверхности ткани, в отличие от гладкой пленки возможно осаждение более толстых слоев (до 1,5—3,0 до 13,8 мкм для растворов различного комплексного состава) вследствие более равномерного распределения напряжений и фактического прораствания металла между волокнами сквозь крупные поры подложки.

Наиболее оптимальными функциональными свойствами обладали покрытия, полученные на текстильных подложках комбинированным способом: первый тонкий слой (1,7—1,9 мкм) Ni-P получали из аммиачного либо ацетатного растворов, обеспечи-

вающих высокую адгезию мелкозернистого (3—

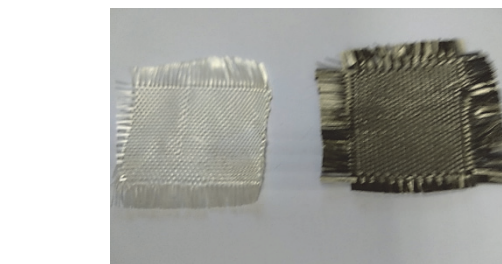


Рис. 1. Фотографии исходной стеклоткани и с покрытием Ni-P толщиной 12 мкм

В результате на инертных текстильных подложках были получены блестящие комбинированные слои Ni-P, Рис. 1, практически неотделимые от основы расслаиванием и клейкой лентой. Эти покрытия имеют адгезию к текстильной основе, превышающую 1,5 МПа и обладают достаточно высоким коэффициентом светоотражения (~80—85 %); удельное сопротивление комплексных слоев на ткани составляет всего 0,4—1,5 Ом·м, что соответствует требованиям ГОСТ к защитной одежде.

Выводы. В результате проведенных исследований обнаружены существенные различия в закономерностях формирования и функциональных свойствах автокаталитических покрытий Ni-P, нанесенных на полиэфирные и силикатные материалы с различным типом поверхности — пленки и ткани. Полученные на текстильных подложках комбинированные слои электропроводны и характеризуются высоким коэффициентом светоотражения, однако серьезной проблемой является хрупкость металлизированной автокаталитическим методом ткани, поскольку содержание фосфора в покрытиях может достигать 8—12 ат.%.

1. В.В. Свиридов, Т.Н. Воробьева, Т.В. Гаевская, Л.И. Степанова Химическое осаждение металлов из водных растворов.— Мн.: Университетское, 1987.
2. G.O., Mallory, J.B. Hajdu Electroless Plating: Fundamentals & Applications.— American Electroplaters and Surface Finishers Society: Orlando F 1, 1990.
3. А.Б. Дровосеков, М.В. Иванов, О.А. Полякова, Т.Е. Цупак Коррозионные свойства и защитная способность химикокаталитических Ni-P покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности.— 2011 (XIX), № 4, 41—46.
4. Петухов И.В. О механизме роста Ni-P-покрытий, получаемых методом химического осаждения // Электрохимия.— 2007, (43), № 1, 36—43

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ДРЕВЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ ОТХОДОВ КОЖКАРТОНОВ

К.И. Тарутько¹, А.Н. Буркин², И.М. Грошев¹

¹Открытое акционерное общество «Витебскдрев»; zymmix@gmail.com

² Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Любые отходы по своему химическому составу, агрегатному состоянию и физическим параметрам являются потенциальным возобновляемым ресурсом. Данные показатели могут служить основой для новой классификации и экспертизы отходов как сырья для изготовления продукции с использованием традиционных или вновь создаваемых современных технологий переработке отходов.

Актуальность в сфере обращения с отходами обусловлена двумя причинами: во-первых, отходы, как правило, содержат полезные вещества и материалы, неэффективное использование которых означает их потерю для экономики; во-вторых, они загрязняют окружающую природную среду.

Переработка отходов позволит снизить количество первичных сырьевых ресурсов, расширить ассортимент выпускаемой продукции, снизить материалоемкость продукции, уменьшить количество отходов, подлежащих захоронению и обезвреживанию, что, в свою очередь, сократит отрицательную нагрузку на окружающую среду, позволит перевести предприятие в разряд ресурсосберегающих, мало- и безотходных [1].

На основе разработанных дополнительных признаков классификации производственных отходов деревообрабатывающих предприятий и предприятий легкой промышленности (физическая структура и химический состав, отношение к температуре, влаге и др.) ОАО «Витебскдрев» и УО «ВГТУ» ведут работы по изготовлению из отходов конструкционных и теплозвукоизоляционных материалы для строительства.

Разработана технология по совместному использованию древесных отходов и отходов кожевенных картонов, образующихся на обувных предприятиях.

Технологический процесс изготовления композиционных материалов из древесных отходов с добавлением отходов обувных картонов состоит из следующих технологических операций:

- 1) подготовка отходов;
- 2) приготовление связующего;
- 3) формирование композиционной смеси;
- 4) горячее прессование;
- 5) послепрессовая обработка (охлаждение, обрезка);
- 6) упаковка.

В ходе исследования возможности изготовления композиционных материалов из отходов получены материалы с разными массовыми долями отходов. В качестве связующего вещества использовали фенольную смолу. Менялись также технологические параметры прессования — давление, температура и длительность прессования. Получено около 30 образцов композиционных материалов с разными физико-механическими свойствами.

Анализ результатов испытаний и внешнего осмотра получившихся образцов показал, что изменения температурного режима, давления и его время воздействия, по-разному влияют на плотность. Высокая температура отрицательно влияет на внешний вид плит состоящих из картонов с высоким содержанием кожевенных волокон — появляются прогоревшие черные пятна. Волокна перегреваются и начинают плавиться это плохо влияет на товарный вид, а также на прочностные характеристики изделия.

Плиты, состоящие из картонов с высоким содержанием кожевенных волокон наиболее хрупки, это накладывает определенные трудности при транспортировке, а также при непосредственном использовании потребителем. Эта проблема решена путем введения дополнительных технологических процессов.

В дальнейшем планируется изучение влияния каждого параметра на качественные характеристики готового изделия, такие как: прочность на изгиб, прочность на разрыв, класс эмиссии формальдегида и пр. Однако уже сейчас можно признать, что отходы обувных картонов пригодны в качестве сырьевой добавки материалов строительного назначения.

Исследования рынка использования полученных материалов показал, что листовые материалы, полученные из отходов обувного картона и древесного волокна, могут использоваться в строительстве в качестве подкладки для настила полов из ламинированного покрытия и в качестве перегородок в помещениях с отделкой декоративными обоями или покраской, где не происходит долговременного контакта материала с влагой.

1. Радюк А.Н., Буркин А.Н., Дойлин Ю.В., Тарутько К.И., Грошев И.М. Разработка технологии производства новых композиционных материалов на основе отходов производства // Состояние и перспективы развития производства древесных плит и фанеры. — 2022, № 25, 102—112

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБУВНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В.Д. Борозна¹, А.Н. Буркин¹, В.А. Гольдаде², С.В. Зотов², В.Е. Сыцко³

¹Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь, wilij@mail.ru

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси

³Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Беларусь

Введение. Полимерные композиты широко применяются во всех отраслях и сферах жизнедеятельности человека. В настоящее время в производстве обуви широко используют композиционные материалы, а именно искусственные кожи (ИСК).

ИСК являются слоистыми композиционными материалами, свойства которых зависят от структуры текстильной основы и свойств сырья, из которого изготовлен текстильный материал. Исследование влияния структуры ИСК на технологические и эксплуатационные свойства позволит разработать рациональную структуру ИСК с заданными свойствами, адаптированными к условиям эксплуатации обуви.

Цель. В настоящей работе будут рассмотрены результаты исследований технологических и эксплуатационных свойств ИСК с различными структурами, применяемые в производстве обуви, с целью анализа влияния структуры на свойства ИСК.

Материалы и методы. В качестве исследуемых образцов использовали ИСК: «Эко-кожа», Китай; «Met lack бордо», Германия; «Nubuk», Турция; «Однослойная ИК, арт. M1042-36», Китай; «Двухслойная ИК, арт. Hongxin 11022-16» Китай.

Методом сканирующей электронной микроскопии срезов установлено, что образцы ИСК имеют многослойную структуру (2–4 слоя, за исключением «Однослойная ИСК, арт. M1042-36»). Верхний полимерный слой выполнен из полиуретана, причем в зависимости от используемых добавок он может быть губчатым, корпускулярным, макропористым, мезопористым или микропористым. Текстильными основами ИСК является ткани, комбинирование нетканого материала и ткани, нетканый материалы из термоскрепленных волокон (преимущественно полиэфирных и полиэтилентерефталатных).

Методики исследования технологических и эксплуатационных свойств ИСК изложены в работах [1, 2].

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования технологических и эксплуатационных свойств представлены в таблице 1.

Анализируя полученные результаты исследований, можно сделать вывод, что вид текстильной основы влияет на физико-механические свойства материала. ИСК, имеющие нетканые основы, обладают большим удлинением в связи с способностью нетканых материалов структурно ориентироваться

вдоль приложенной нагрузки, однако они обладают низким пределом прочности. ИСК, имеющую в своей структуре ткань, в связи со сложностью перестройки структуры в процессе деформирования, обладают меньшим относительным удлинением, однако вследствие наличия узлов переплетения и ограниченность перемещения волокон видом переплетения увеличивается предел прочности материала.

Таблица 1. Технологические и эксплуатационные свойства ИСК

Показатели		«Эко-кожа»	«Metlack бордо»	«Nubuk»	«Однослойная ИК, арт. M1042-36»	«Двухслойная ИК, арт. Hongxin 11022-16»
Толщина, мм		1,8	1,0	1,4	1,6	0,9
Поверхностная плотность, г/м ²		784	568	624	546	435
Разрывная нагрузка, Н	В	232	293	321	386	235
	П	284	397	444	372	135
Предел прочности, МПа	В	6,4	13,9	11,5	12,1	13,0
	П	8,0	18,9	15,8	11,6	7,5
Относительное удлинение при разрыве, %	В	38	20	25	98	71
	П	28	34	32	137	140
Комплексный показатель оценки технологической пригодности	В	0,57	0,67	0,60	0,61	0,57
	П	0,63	0,66	0,70	0,40	0,59
Комплексный показатель эксплуатационной пригодности	В	0,79	0,66	0,52	0,89	0,70
	П	0,82	0,71	0,53	0,90	0,69

Структура полимерного слоя, наличия развитой структуры пор является важным фактором, влияющим на эксплуатационные свойства материалов. Наличие губчатой структуры с макропорами значительно ухудшает эксплуатационные свойства ИСК.

- Борозна В.Д., Буркин А.Н. Разработка методики исследования эксплуатационных свойств искусственных кож // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018 (35), № 2 (35), 7–17.
- Борозна В.Д., Буркин А.Н., Козловская Л.Г., Цобанова Н.В., Гольдаде В.А., Зотов С.В. Свойства искусственных кож, применяемых для производства заготовок верха обуви внутреннего способа формования // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2020 (38), № 1(38), 18 - 31

МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ

В.Е. Бабич¹, В.Я. Лебедев¹, С.В. Якубовская²

¹Государственное научное Учреждение «Физико-технический институт национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; fti_lebedev@mail.ru

²Белорусский национальный технический университет

Магнитно-абразивную обработку поверхности деталей можно сравнивать с обработкой свободным абразивом, которая, в отличие от обработки связанным (связкой) абразивом оказывает значительно меньшее ударное воздействие на обрабатываемую поверхность. Производительность магнитно-абразивной обработки, качественные показатели поверхности при прочих равных условиях, будут определяться концентрацией зёрен абразивов в магнитно-абразивном материале. Концентрация зёрен абразива в магнитно-абразивных материалах с объёмным расположением зёрен ограничена концентрациями магнитного компонента и связующего. Изменение структуры магнитно-абразивного композиционного материала и расположение зёрен абразива на поверхности магнитной частицы позволяет повысить количество зёрен абразива, участвующих в процессе резания (рис. 1, а).

В работе изучено влияние структуры магнитно-абразивных порошков (фракция 400/315 мкм) на морфологию поверхностей изнашивания пластин твёрдого сплава марки ВК-8 и сегментов алмазосодержащего композиционного материала. Концентрации зёрен алмаза фракции 40/28 мкм в композиционных магнитно-абразивных порошках 6 об.%. Концентрация оксида железа в композиционном магнитно-абразивном порошке с объёмным расположением зёрен алмаза — 60 об.% связующее — остальное.

Магнитно-абразивная обработка пластин твёрдого сплава композиционными порошками с объёмным и поверхностным расположением зёрен алмаза приводит к формированию на их поверхности характерных микрорельефов (рис. 1, б, в). Обработка пластин твёрдого сплава композиционным порошком с объёмным расположением зёрен алмаза приводит к формированию сглаженного микрорельефа, частицы карбида вольфрама незначительно выступают над прослойками кобальта, в то время как обработка композиционным порошком с поверхностным расположением зёрен алмаза формирует развитый микрорельеф поверхности: частицы карбида вольфрама выступают над прослойками кобальта, часть частиц карбида вольфрама разрушена (рис. 1, б, в). Обработка сегмента композиционным порошком с поверхностным расположением зёрен алмаза,

приводит к изнашиванию связки и выступанию зёрен алмаза из связки (рис. 1, г).

Различия в морфологии поверхностей изнашивания пластин твёрдых сплавов при магнитно-абразивной обработке композиционными порошками указывает на преимущественное взаимодействие связки (объёмное расположение зёрен алмаза) и алмазных зёрен (поверхностное расположение зёрен алмаза) с обрабатываемой поверхностью. Связка композиционного материала снижает динамическое воздействие алмазных зёрен на обрабатываемую поверхность, что приводит к снижению скорости её изнашивания. Магнитно-абразивные порошки с поверхностным расположением зёрен абразива могут быть использованы для селективной обработки компонентов композиционных материалов (рис. 1, г).

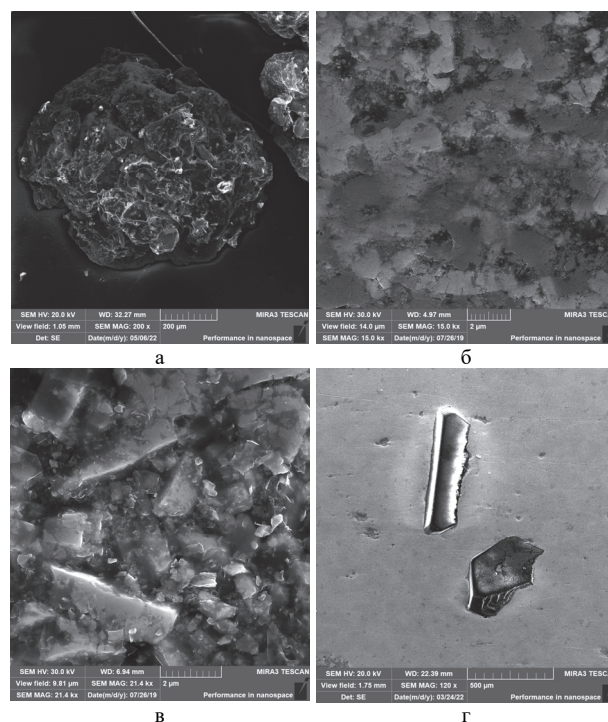


Рисунок 1 – Морфология поверхности композиционного порошка (а) и морфологии поверхностей изнашивания пластин твёрдого сплава (б, в) и алмазосодержащего сегмента (г); б – обработка композиционным порошком с объёмным расположением зёрен алмаза; в, г – обработка композиционных порошков с поверхностным расположением зёрен алмаза

GRAVIMETRIC STUDY OF IRRADIATION EFFECT
ON POLY-L-LACTIDE HYDROLYSISA.A. Fedorenko^{1,2}, Y.V. Hryniuk¹, S.V. Kostjuk^{1,2}, and I.A. Sal'nikova³¹ Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: sashfedorenko@gmail.com² Department of Chemistry, Belarusian State University, Minsk, Belarus³ Joint Institute for Energy and Nuclear Research, National Academy of Sciences of Belarus, Sosny, Belarus

Poly-L-lactide (PLA) is fully biodegradable polymer synthesized from renewable resources. Nonetheless its degradation in nature may take several years [1]. PLA biodegradation is a two step process. On a first step polymer hydrolysis takes place followed by assimilation of low molar mass chains by microorganisms on a second stage. Decrease of PLA molar mass accelerates the first step. PLA undergoes primary scission during exposure to ionizing radiation, thus it can be used prior to polymer biodegradation [2]. Aim of this work was to determine gamma-irradiation effect on PLA hydrolysis after treatment. Two doses (29 and 75 kGy) were chosen. Dose 29 kGy can be used for sterilization of PLA-based medical devices or packaged food. At this dose level PLA still have sufficient mechanical strength, but its biodegradation after utilization is assumed to be faster. Absorption of 75 kGy dose makes PLA too brittle, so it can be used as a predegradation step only.

Commercial PLA 4043D grade (NatureWorks, USA) with $M_w = 190$ kDa was used. Samples of PLA films obtained by extrusion were placed in testing tubes filled with distilled water and sealed. Tubes were inserted into water bath heated to 60 °C. This temperature was chosen because it is typical for composting process. It should be noted that under such conditions initially amorphous PLA films rapidly crystallized, which greatly affects polymer hydrolysis.

Results of gravimetric analysis used for study of PLA hydrolysis process are summarized in tabl. 1. Films were dried in vacuum for 5 days before weighing.

Table 1. PLA films mass loss during hydrolysis at 60 °C in aqueous media

Hydrolysis time, days	0 kGy	29 kGy	75 kGy
	$\Delta m, \%$		
1	-0,203	0,476	-2,335
3	-0,210	-1,333	-7,880
5	-0,386	-0,518	-9,091
10	-0,857	-1,501	-14,047
30	-20,074	-25,811	-32,874
50	-34,188	-36,833	-43,351

Decrease of hydrolyzed polymer films mass occurred when chains of low molar mass soluble in water are formed. They diffuse from polymer film to solution. For all samples decrease of film mass with hydrolysis time is observed (tabl. 1). For samples irradiated with 75 kGy dose (PLA75) pronounced mass loss already

started on a first day of hydrolysis. This indicates that chains with sufficiently low molar mass to be soluble in a water were formed in the structure of PLA75. Their presence is attributed to chain scission during irradiation. For unirradiated films (PLA0) and irradiated with 29 kGy dose (PLA29) notable decrease of mass started only on 30th day of experiment. Scission of PLA backbone during hydrolysis occurred randomly but with different frequency in crystalline and amorphous regions. Formation of water soluble fraction in PLA0 and PLA29 took time, while in PLA75 such fraction was presented even before hydrolysis. Further PLA overall mass decrease was dose dependent and for PLA75 it was highest. For all samples final mass decrease didn't exceed 45 %. This was due to the PLA crystallization under experimental conditions. Effectiveness of hydrolysis in crystalline regions of the polymer is much lower than in amorphous one [1]. Thus with time amorphous phase of PLA is eluted from film and the content of crystalline phase rises. This leads to increase of time needed for complete hydrolysis of PLA.

Exposure of PLA to a 75 kGy dose accelerates polymer hydrolysis. Therefore it can be proposed as a precomposting step, or technique used before hydrolysis of PLA during its recycling. Exposure of PLA to a 29 kGy dose doesn't have pronounced effect on hydrolysis rate, so it can be only considered as sterilization method. If properties of polymer material required for specific usage allowed to use poly-D,L-lactide that cannot crystallize, it will be more environmentally friendly to use it owing to higher hydrolysis rate.

Study of PLA molecular mass and crystallinity degree change during hydrolysis is now conducted.

The research was supported financially by grant 1.3.04.05 "Radiation-chemical modification of the structure and properties of synthetic and natural biodegradable polymers" of the State program of scientific research "Energy and Nuclear Processes and Technologies".

1. Tsuji H., Ikada Y. Blends of crystalline and amorphous poly (lactide). III. Hydrolysis of solution-cast blend films // J. Appl. Polym. Sci. – 1997 (63), №7 – P. 855–863.
2. Vargas L.F., Welt B.A. et al. Epoxy Layered Effect of electron beam treatments on degradation kinetics of polylactic acid (PLA) plastic waste under backyard composting conditions // Packaging Technology and Science: An International Journal. — 2009 (22), №2 – P. 97–106.

ОЧИСТКА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ СМАЗОЧНЫМ МАСЛОМ КОМПРИМИРОВАННОГО CO_2 ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАРБАМИДА

В.Ю. Шумская, П.Н. Гракович, С.Ф. Жандаров

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, viktoriya-shumsk@mail.ru

ОАО «Гродно Азот» является ведущим экспортоориентированным производителем жидкого азотного удобрения КАС (карбамидно-аммиачной смеси). Качество производимого удобрения в значительной степени определяется чистотой используемых компонентов. В настоящее время в одном из компонентов удобрения — водном растворе карбамида, регистрируется высокое содержание масла 18–20 мг/дм³, что значительно снижает качество выпускаемой продукции и является неприемлемым для экспортных потребителей. Основным источником масла в растворе карбамида являются поршневые компрессоры модели 4ГМ16-100/200, используемые для компримирования двуокиси углерода.

Снижение содержания масла в КАСе позволит повысить конкурентоспособность производимого сырья, расширить рынки сбыта, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Цель работы — поиск и реализация решения проблемы снижения содержания смазочного масла в нагнетаемом газе компрессоров, и как следствие, снижение содержания масла в растворе карбамида.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать место установки фильтрационного оборудования (ФО) с фильтрующими элементами (ФЭ);
- определить состав волокнисто-пористых материалов (ВПМ) ФЭ, эффективность фильтрации ФЭ на стенде испытания газовых фильтроэлементов;
- рассчитать количество ФЭ, необходимых для эффективной фильтрации;
- разработать конструкцию ФО;
- контролировать содержание смазочного масла в растворе карбамида при промышленных испытаниях.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали нетканые ВПМ на основе полипропилена (ПП) Borflow HL512FB («Borealis», Австрия), изготовленные по технологии аэродинамического распыления расплава из полипропилена; материал Грифтекс, полученный газодинамической вытяжкой расплава политетрафторэтилена (Фторопласт-4, ГОСТ 10007) в вакууме; фильтровальную боросиликатную стеклоткань марки Н13.

Лабораторное определение эффективности фильтрации ФЭ проводили на стенде испытания газовых фильтроэлементов, принцип работы которого основан на регистрации в воздушном потоке количества частиц

масляного аэрозоля с полидисперсным распределением капель с помощью лазерного счетчика, который производит регистрацию частиц по шести каналам от 0,3 до 10 мкм. Образец для лабораторных испытаний представлял собой ФЭ высотой 300 мм, аналогичный по конструкции серийно выпускаемому. Условия испытаний соответствовали реальным.

Результаты и обсуждение

Анализ проблемы показал, что улавливание масляного аэрозоля после компрессора двуокиси углерода принципиально невозможно, т.к. в этих условиях ($T = 140 \dots 150^\circ\text{C}$, $P = 20$ МПа) углекислый газ находится в сверхкритическом состоянии. Являясь сильнейшим растворителем, он прекрасно растворяет любой нефтепродукт, переводя его в молекулярное состояние.

Оптимальным решением является размещение ФО после холодильника 3-й степени сжатия компрессора ($T = 40 \dots 45^\circ\text{C}$, $P = 3,1$ МПа), где двуокись углерода находится в газообразном состоянии, а содержащееся в нем масло — в виде аэрозоля.

Определена эффективность фильтрации лабораторных образцов. Установлено, что наилучшей эффективностью 99%, при скорости 0,1 м/с, обладает комбинация ПП+Н13+Грифтекс+ПП, которая легла в основу спроектированного ФЭ.

Разработанное и изготовленное ФО прошло промышленные испытания в цеху карбамида 2-й очереди ОАО «Гродно Азот».

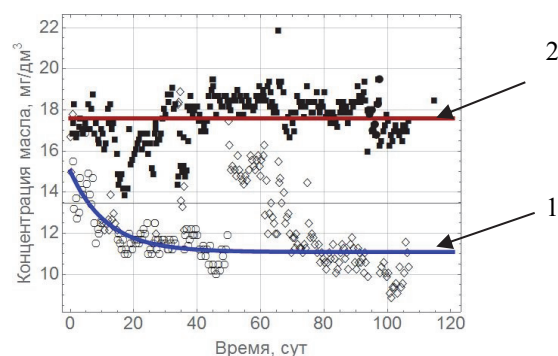


Рис. 1. Сравнение содержания смазочного масла в растворе карбамида с использованием ФО (1) и без (2)

Опытно-промышленная апробация показала, что разработанное ФО снижает загрязнение CO_2 маслом на 75%.

Благодарности. Работа выполнена в рамках договора НИОКТР с ОАО «Гродно Азот» №И-15/2021 от 15.02.2021 г.

БИОКОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СОСУДИСТЫХ КОНДУИТОВЕ.А. Цветкова¹, Е.Ю. Дорошко², Н.С. Винидиктова¹, И.Ю. Ухарцева³, С.В. Зотов¹¹ Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; tsvetkova21@mail.ru² Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь³ Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Введение. Проблемой современного медицинского материаловедения является научно обоснованный выбор материалов, свойства которых в максимальной степени приближены к свойствам живых тканей. Лечение пациентов с облитерирующими заболеваниями артерий является одним из наиболее проблемных разделов сосудистой хирургии. Важным для создания материалов, функционирующих в условиях контакта с кровью, кроме гемосовместимости, является соответствие основным биологическим, биомеханическим и технологическим требованиям: биосовместимости; эластичности, близкой к эластичности сосуда; структуре, обеспечивающей высокий предел прочности; возможности изготовления в условиях массового производства; легкости предварительной обработки и др.

Цель работы – разработка эластичного композиционного материала для модифицирования протеза сосуда для защиты от инфекции.

Материалы и методы. Для изготовления образцов для модифицирования сосудистых кондуитов использовали поливиниловый спирт (ПВС, ГОСТ 10779, марка М ХЧ), поливинилпирролидон (ПВП, марка K12(3500), хитозан низкомолекулярный (30–100), L-аспарагиновую кислоту (Великобритания), низкомолекулярную гиалуроновую кислоту 20—50 KDa (Франция), антибиотик (ванкомицин). Выбор материалов для изготовления экспериментальных образцов осуществляли, исходя из медицинских требований к материалам и разрешения Минздрава Республики Беларусь на их имплантацию.

Образцы для модельных исследований с различным соотношением компонентов формировали по растворной технологии получения гелей. С целью формирования упорядоченной нерастворимой в воде матрицы, способной удерживать лекарственное средство, проводили криообработку образцов и обработку коронным разрядом. Перед проведением медико-биологических исследований модифицированные образцы кондуита погружали в 1 % раствор ванкомицина до полного восстановления эластичности покрытия.

Для определения вязкоупругих свойств гидрогелей применяли метод динамического индентирования с использованием установки ИПМ–1К. Структуру экспериментальных образцов изучали при помощи электронного микроскопа OLYMPUS TH4-200.

Результаты и их обсуждение. Разработанные композиции ПВС–хитозан–кислота представляют собой сложную систему с различными пространственными конфигурациями переменного состава, что обуславливает наличие анизотропии основных физических свойств. Варьируя условия формирования криогелей, можно направленно регулировать морфологию композиционного материала. Введение композиции аминокислот позволяет инициировать образование комплексных соединений в объеме материала, что повышает биосовместимость, а также позволяет в широких пределах регулировать эластичность и липкость.

Серия экспериментов по оценке электростатических свойств материалов, используемых для биодеградируемого материала сосудистого кондуита, показала возможность моделирования структуры естественного кровеносного сосуда. Установлено, что вязкоупругие свойства разработанных композиций оптимальны для обеспечения эпителизации и защитных функций кондуитов от инфицирования.

Бактериологические, ПЦР-исследования и качественная оценка антибактериальной активности образцов синтетических сосудистых имплантатов, модифицированных гидрогелевой композицией с различным содержанием компонентов, свидетельствуют о бактерицидной активности по отношению к *St. aureus* в сравнении с промышленно выпускаемыми имплантатами.

Разработаны криогели на основе гидрофильного комплекса ПВС–хитозан с интерполимерными межмолекулярными связями, способного вступать во взаимодействие с наполнителями различной природы с образованием системы «полимер – биологически активное вещество», обеспечивающей пролонгированное и дозированное высвобождение активного компонента из матрицы. В ходе комплексного многоступенчатого модифицирования компонентов композита достигается формирование водонерастворимого сшитого эластичного криогеля, несущего электростатический заряд, в том числе обеспечивающий иммобилизацию и удерживание лекарственных средств.

Работа выполнена в рамках договора № 3/2019 «Исследование и разработка гидрогелевых систем на основе модифицированных полимеров для медицинских приложений» между ИММС НАН Беларуси и ГГМУ.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Е.Ф. Кудина^{1,2}

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; kudina_mpr@tut.by

В настоящее время разработано большое количество композиционных покрытий и систем покрытий для защиты поверхности металлических изделий от разрушений, протекающих в результате процессов коррозии [1—3]. К эксплуатационным свойствам таких материалов предъявляются требования обеспечения поверхности материалов от разрушения в условиях повышенной влажности среды, перепадов температур, воздействия агрессивных сред и др. Предлагаемые материалы широко варьируются по составу и свойствам, а также технологиям нанесения на поверхность и стоимости. Однако многие не отвечают комплексу требований, предъявляемых к защитным покрытиям, поэтому разработка таких материалов остается актуальной.

В качестве связующего защитных покрытий отверждаемых без дополнительного нагрева в данной работе используется эпоксидная смола (ЭС). Эффективность применения в качестве связующего ЭС обусловлено высокими показателями прочности и адгезии формируемых покрытий, широкими возможностями варьирования процессом отверждения, а также большим ассортиментом ЭС [2, 3].

Цель работы — получить составы защитных покрытий для стальных поверхностей на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20.

Методика исследований. Объектом исследования являлись композиты на основе ЭС. Для модифицирования ЭС применяли органический компонент (фенолоформальдегидную смолу) и высокодисперсные силикатсодержащие продукты (ценосферы и шунгит).

Результаты исследований и их обсуждение.

Улучшение эксплуатационных характеристик покрытий на основе ЭС может быть достигнуто при комплексном подходе, включающем модифицирование связующего органическими и неорганическими компонентами; проведение абразивно-струйной обработки поверхности металла; нанесение на очищенную поверхность металла активного кремнийорганического конверсионного слоя.

Согласно полученным данным, введение наполнителей в ЭС приводит к повышению хрупкости материала. Однако введение ФФС позволяет перейти от хрупкого разрушения материалов к упруго-пластичной деформации. Наполнение бинарной матрицы ЭС/ФФС силикатсодержащими компонентами не приводит к охрупчиванию композитов и не ухудшает их пластичных свойств.

Введение дисперсных наполнителей приводит к увеличению прочности композитов: шунгит — до 34%, ценосферы — до 14%. Наблюдаемый рост физико-механических показателей связан с микродисперсионным упрочнением матрицы.

В образцах на основе ЭС отмечен рост микротвердости до $\approx 30\%$. Наибольшее увеличение микротвердости (до 18%) матрицы ЭС/ФФС отмечено при введении наполнителей в количестве 1%.

Изучение воздействия агрессивных сред (соляной кислоты и щелочей) на ЭС в зависимости от типа введенного наполнителя показало наиболее эффективное действие шунгита. Введение шунгита приводит к снижению разрушения композита при воздействии соляной кислоты на 7—20%.

Модифицирование органическим компонентом снижает устойчивость матрицы к воздействию агрессивных сред. Кинетика разрушения образцов на основе ЭС/ФФС как в соляной кислоте, так и гидроксиде натрия 1,5—3 раза выше, чем у образцов на основе ЭС. Введение наполнителей в бинарную матрицу приводит к дальнейшему снижению устойчивости материала к воздействию агрессивным средам. Наименьшему разрушению подвержены образцы, наполненные шунгитом.

Оптимизированы составы защитных покрытий. Показано, что наибольшее улучшение эксплуатационных свойств материала достигается при: нанесении покрытия на металлическую поверхность после абразивно-струйной обработки на созданный активный полисилоксановый конверсионный слой, модифицировании ЭС компонентом ФФС и введении в качестве наполнителя шунгита.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского (Узбекского) фонда фундаментальных исследований (код проекта T21Y3BG-012).

1. Review on Materials for Composite Repair Systems / V.P. Sergienko [et al] // Non-destructive Testing and Repair of pipelines / Ed. by E.N. Barkanov, A. Dumitrescu, I.A. Parinov. — Springer International Publishing, 2018. — P. 269-189.
2. Kudina, H.F. Composite Materials Intended to Repair Mechanochemical Defects in Pipelines / H.F. Kudina, S.N. Bukharov and V.P. Sergienko // In: Advances in Engineering Research. Vol. 26 / Ed. by V.M. Petrova. — New York: Nova Science Publishers, Inc., 2019. — Ch. 3. — P. 107-172.
3. Comparative Analysis of Existing Technologies for Composite Repair Systems / H. Kudina [et al] // Non-destructive Testing and Repair of pipelines / Ed. by E.N. Barkanov, A. Dumitrescu, I.A. Parinov. — Springer International Publishing, 2018. — P. 241-267.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 3

Трибология

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)

28—30 июня 2022 г., Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК БИОУГЛЕРОДОВ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕДИ

А.Ф. Ильющенко¹, А.В. Лешок², С.А. Янковский²

¹Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь; sdilav@tut.by

²Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, Томск, Россия

Фрикционные материалы активно используются в различных областях техники. Порошковая металлургия позволяет создавать материалы, получение которых другими способами затруднено. Материалы в своей структуре могут содержать компоненты различной природы, химического состава. Их сочетание придает материалу уникальные физико-механические, триботехнические свойства [1, 2].

Биоглероды (БУ) получаемые путем пиролиза получают все большее распространение при разработке новых материалов, и могут рассматриваться в качестве альтернативных углеродсодержащих добавок.

Цель — исследование влияния добавки биоуглеродов в состав фрикционного материала на основе меди, на триботехнические свойства, при работе в условиях граничного трения.

Материалы и методы

В работе использовались добавки биоуглеродов, полученных путем пиролиза из скорлупы грецкого ореха и биомассы.

Исследование триботехнических свойств осуществлялось на машине трения типа ИМ-58 при следующих режимах: начальная скорость торможения — 10 м/с; удельная нагрузка — 4,0 МПа; момент инерции маховых масс — 0,56 Н·м·с²; работа трения — 27,5 кДж. В качестве контртела использовали диск из стали 65Г твёрдостью 260—320 НВ, шероховатостью рабочей поверхности Ra 0,7—0,8 с размерами, идентичными размерам фрикционного слоя.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные работы показали, что увеличение содержания добавки биоуглерода из скорлупы грецкого ореха в интервале 10—40 об.% показывает рост значения коэффициента трения с 0,041 до 0,066, одновременно с этим фиксируется рост износа — с 4,0 до 12,1 мкм/км соответственно. Частицы биоуглерода из скорлупы грецкого ореха изнашиваются равномерно с металлической бронзовой матрицей (рисунок 1а). Увеличение содержания добавки порошка более 35,0 об.% нецелесообразно, вызывая повышенный износ. На поверхности пластически деформированной бронзы присутствуют частицы, сформированные в процессе разрушения биоуглерода размером 50—500 нм, содержание которых существенно больше, чем на поверхности стального кон-

тртела. Отмечается, что увеличение содержания добавки приводит к росту износа стального контртела с 1,0—1,2 до 2,8—3,0 мкм/км, при этом шероховатость увеличивается с 0,45 до 0,84 мкм.

В случае использования биоуглерода из биомассы коэффициент трения имеет аналогичное значение, при этом отмечается несколько более высокий износ фрикционного материала. Анализ морфологии поверхности трения показал, что износ биоуглерода из биомассы имеет несколько иной характер. Он представляется в виде пластически деформированных участков, покрывающего оловянистую бронзу (рисунок 1, б).

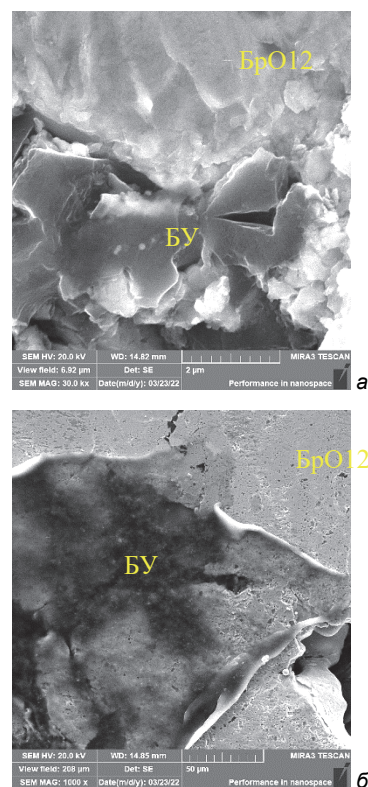


Рис. 1 – Морфология поверхности трения фрикционного материала, содержащего добавку различного биоуглерода

1. Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н., Алексеенко Н.А. Особенности изнашивания порошкового фрикционного материала на основе меди в условиях граничного трения // Трение и износ. – 2019. – Т.40, № 6. С. 654-660.
2. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы // Киев, 1980. - 404 с.

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПО КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ «ШАР-ДИСК»

М.В. Прожега, Е.О. Решиков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия; info@imash.ru

Введение

Трибологические испытания широко используются для исследования природы трения и износа, определения свойств новых антифрикционных и износостойких материалов, проверки работоспособности покрытий. Доступное отечественное оборудование для проведения трибологических испытаний на рынке отсутствует. При проведении исследований часто используется морально устаревшие машины трения, которые модернизируют, обеспечивая прежде всего возможность измерять коэффициент трения во время испытания [1, 2].

Различные кинематические схемы, геометрические формы образцов, условия нагружения и режимы испытаний отражаются на результатах исследований. Для сравнения трибологических свойств материалов и покрытий, определяемых экспериментально следует использовать стандартные методики [3].

В зарубежной литературе широко распространена схема испытаний штифт-диск или шар-диск, соответствующая стандарту ASTM G99 при вращательном движении образца-диска или ASTM G133 – при возвратно-поступательном движении образца. Кинематическая схема шар-диск предпочтительна для исследования трения при высоких контактных нагрузках. Индентор в виде шара способен самоцентрироваться, в отличие от цилиндрической или квадратной формы штифта, что обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов [4].

Цель работы – разработка стенда для трибологических испытаний материалов и покрытий по кинематической схеме – «шар-диск» в соответствии с международными стандартами.

Конструкция стенда. Стенд (рис. 1) обеспечивает плавное регулирование скорости вращения образца-диска при помощи частотного преобразователя, управляющего электродвигателем, который установлен в корпусе стенда.

Постоянство условий нагружения образца обеспечивается при помощи грузов заданной массы, которые размещают на инденторе.

Радиус трения регулируется при помощи перемещения каретки, на которой размещен тензодатчик с индентором.

Сила трения измеряется при помощи тензодатчика, а данные выводятся на экран компьютера и регистрируются в цифровой форме для последующей

обработки.

Технические характеристики стенда приведены в таблице 1. Сменная оснастка стенда позволяет испытывать образцы со смазочным материалом.



Рис. 1. Трибологический стенд Триботест

Таблица 1. Технические характеристики стенда

№	Параметр	Значение
1	Диапазон измерения коэффициента трения	0,05...1 ($\pm 1,5\%$)
2	Скорость скольжения, м/с	0,1...1
3	Максимальное усилие на индентор, Н	25
4	Диаметр шарика (штифта), мм	10 или 6
5	Размер образца, мм	40
6	Макс. крутящий момент, Нм	1
7	Мощность двигателя, Вт	0,3
8	Габаритные размеры, мм	360x220x600

Заключение. Разработанный стенд работает в соответствии с международным стандартом ASTM G99 и может быть представлен на отечественном рынке доступного оборудования для исследования трибологических свойств материалов и покрытий.

1. Загидуллина Д. Р., Ибатуллин И. Д., Емельянов С. Г. Устройства для испытаний на трение и изнашивание // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016, (18), № 4-2, 285-290
2. Сенин П. В., Ионов П. А., Столяров А. В., Земсков А.М. Устройство для триботехнических испытаний пар трения // Трение и износ. — 2020 (41), № 2, 188—195
3. Prozhega M. V. and Reschikov E.O. Solid lubricating coatings tribological test rig development // TopME 2020 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 012029
4. Hoic M., Hrgetic M., Deur J. Design of a pin-on-disc-type CNC tribometer including an automotive dry clutch application // Mechatronics. – 2016 (40), 220-232.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ТРЕНИИ В РЕЖИМЕ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

И.А. Буяновский¹, М.М. Хрущов¹, В.Д. Самусенко¹, В.А. Левченко²

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

²Институт перспективных покрытий и материалов, Тайчжоу, Китай; vladlev@yahoo.com

Цель работы. Как известно, основные трибологические характеристики алмазоподобных покрытий (АП) зависят от технологии их нанесения. Так, установившиеся коэффициенты трения таких покрытий варьируются от 0,01 до 0,7 в зависимости от технологии нанесения. Предлагаемая статья включает сравнение температурной стойкости смазочных сред и морфологии дорожек трения стали по АП: аморфному углеродному (АУ) и монокристаллическому углеродному (МКУ) покрытиям [1].

Материалы и методы. АП толщиной 1,5 мкм синтезированы на торцовых поверхностях стальных дисков методом импульсной конденсации углеродной плазмы, причём для получения m-C покрытия одновременно с напылением осуществляли бомбардировку растущего покрытия ионами аргона. Трибологические исследования проводили на машине трения шар-диск при скорости скольжения 0,02 мм/с, скорости подъёма температуры от внешнего источника тепла 10 °С/мин и нагрузке 7,4 Н в интервале температур 20—200 °С [2]. В качестве смазочной среды использовали инертное масло (вазелиновое медицинское ВМ). Предварительные исследования показали, что для пары трения сталь-сталь коэффициент трения $f = 0,18$, для пары сталь-покрытие a-C — $f = 0,21$, для пары сталь-покрытие m-C — $f = 0,12$ [1].

Морфологию дорожек трения, образовавшихся при трении АП по стальному шару, изучали на оптическом микроскопе Neofot-32 с использованием компьютерной системы обработки и моделирования оптических изображений.

Результаты и их обсуждение. Температурную стойкость ВМ оценивали по величине критической температуры, при которой разрушался граничный слой вследствие дезориентации и десорбции молекул смазочной среды, его образующих (см. Табл. 1).

Таблица 1. Критические температуры исследуемых масел °С

Смазочный материал	Исследуемые пары трения		
	Сталь/АУ	Сталь/МКУ	Сталь/сталь
Масло ВМ	22	140	120
ВМ+0,1%СК	140	170	150
ВМ+1%ОК	22	210	125

Для сравнения испытания проведены также с растворами в масле ВМ олеиновой (ОК) и стеариновой (СК) кислот.

После окончания трибологических испытаний для образцов АУ и МКУ покрытий в среде масла ВМ при температурах 50, 100 и 200 °С была оценена морфология дорожек износа, а также была оценена морфология исходных поверхностей [3].

Проведённый анализ полученных изображений

показал, что разрушение МКУ покрытий в основном определяется как достаточно незначительным износом вершин кристаллитов, так и выламыванием отдельных столбчатых кристаллитов, образуя при этом пустоты, которые, будучи заполненными смазочной средой, возможно, облегчают условие функционирования трибосопряжений. В отличие от МКУ покрытий, дорожки износа АУ покрытия отличаются существенно более заметной шероховатостью, которая возрастает с увеличением температуры процесса. При температурах более 100 °С на поверхностях дорожки износа заметны следы схватывания и вырывов, которые интенсифицируются по мере повышения температуры. Столбчатые кристаллиты при этом объединяются в конгломераты, которые затем выламываются, что приводит к существенно большему разрушению модифицированного слоя, чем это наблюдается для износа МКУ покрытия. Это отличие хорошо заметно на рис. 1, на котором показано как различаются реконструированные 3D-изображения дорожек износа МКУ (рис. 1, а) и АУ покрытий (рис. 1, б) после испытания со смазкой маслом вазелиновым медицинским при температуре 200 °С.

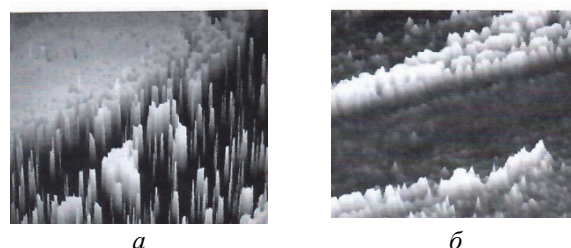


Рис. 1. 3D изображения дорожек износа при 200° С: а – МКУ покрытие; б – АУ покрытие (×200)

Таким образом, разрушения АП складывается из износа по вершинам кристаллитов и выламывания отдельных кристаллитов или их конгломератов. При значительной площади обнажаемой таким образом поверхности может развиваться процесс схватывания, особенно при высоких нагрузках и/или температурах.

1. Levchenko V.A., Buyanovskii I.A., Samusenko V.D. Test of Diamond-Like Coatings with Monocrystalline Carbon for Tribological Purposes // Journal of Friction and Wear. – 2021, V. 42. – № 6. – Р. 478-483.
2. Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самусенко В.Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке: ч. 1. Структура, методы испытаний, смазка адсорбционными слоями // Материаловедение. 2021. – № 9. – С. 3-11.
3. Левченко В.А., Буяновский И.А., Игнатъева З.В., Хрущов М.М. и др. Исследование специфики разрушения алмазоподобных покрытий при трении // Трение и смазка машин и механизмов. – 2013. – № 7. – С. 43-47.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПАРАХ ТРЕНИЯ «МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР»

М.И. Прудников

ООО «Моденжи», Брянск, Россия

В настоящее время развитие и постоянное совершенствование узлов трения машин напрямую связано с ужесточением условий их работы. Уменьшаются габариты с соответствующим увеличением контактных давлений, возрастают скорости относительного перемещения деталей, расширяется температурный диапазон эксплуатации в стороны криогенных или, наоборот, экстремально высоких температур. Одновременно с этим инженеры стремятся создавать машины, не требующие обслуживания. Поэтому все чаще при создании узлов трения использования жидких и пластичных смазочных материалов уже недостаточно. Возникает потребность в твердых смазочных материалах (ТСМ), характерными представителями которых являются дисульфиды молибдена и вольфрама, графит, политетрафторэтилен, оксиды некоторых металлов. Они способны работать в гораздо более широком диапазоне условий, особенно это касается температур и контактных давлений.

Следующим этапом развития применения твердых смазочных материалов являются различные способы их интеграции в поверхность трения. Один из таких способов – антифрикционные твердосмазочные покрытия (АТСП). Они представляют собой тонкий (15—20 мкм) композиционный слой из матрицы связующего вещества, в ячейках которой удерживаются высокодисперсные частицы ТСМ.

Компания Моденжи (г. Брянск, Россия) разработала серию составов для формирования таких покрытий и выпускает их под торговой маркой MODENGY. Покрытия серийно применяются в узлах трения трубопроводной арматуры [1], на поршнях двигателей внутреннего сгорания [2], на резьбовых соединениях обсадных и насосно-компрессорных труб, в пневмоцилиндрах, подшипниках скольжения строительной техники.

Представляет практический интерес применение АТСП в металлополимерных парах. По инициативе нескольких отечественных заводов-изготовителей шаровых шарниров для легковых автомобилей в инженерном центре Моденжи проведены исследования эффективности АТСП в паре трения «Сталь 40Х-полиоксиметилен (ПОМ)». Из ПОМ изготавливают вкладыши шарниров. Лабораторные испытания проводились по стандарту ASTM G99 по схеме «сфера-плоскость» на специальном трибометре (рис. 1). Покрытия MODENGY 1014, MODENGY 1009 и MODENGY PTFE-A20 наносились на образцы в виде стальных дисков (рис. 2). По результатам испытаний установлено, что применение АТСП вместо штатной пластичной смазки ШРБ-4 позволя-

ет уменьшить коэффициент трения до 2,2 раз, а износ до 8,9 раз (рис. 3). Следующим этапом запланированы стендовые испытания шарниров с АТСП.

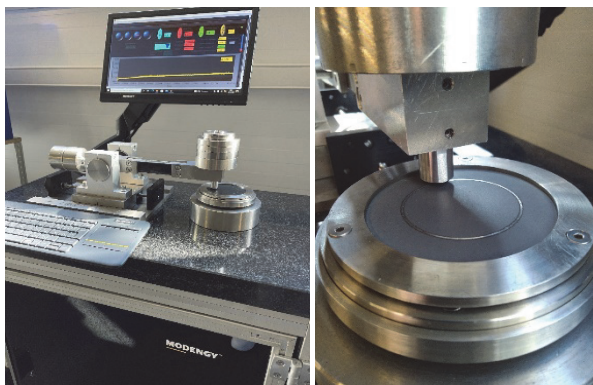


Рис. 1. Общий вид и испытательный блок трибометра для испытаний по ASTM G99

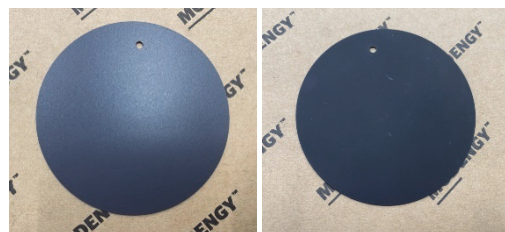


Рис. 2. Образцы для испытаний с АТСП MODENGY 1014 и MODENGY 1009

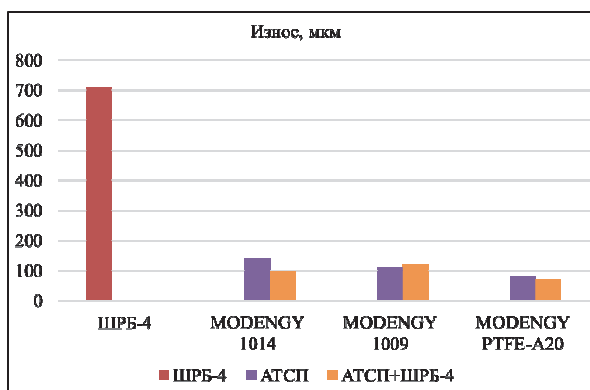


Рис. 3. Результаты испытаний (износ)

1. Прудников, М.И. Эффект применения антифрикционных твердосмазочных покрытий для деталей клапанов ТЭС / М.И. Прудников, А.В. Чекмошеев // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2017. – №6(93). – С. 78-79.
2. Гаврилов, К.В. Оценка антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий для юбки поршня высокофорсированного дизеля / К.В. Гаврилов, А.В. Морозов, М.В. Селезнев, Ю.В. Рождественский, Н.А. Хозенок, А.А. Дойкин, В.С. Худяков // Трение и износ. – 2020. – Том 41, №5. – С.647-654.

О ВЛИЯНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛЬНОГО КОНТРЕЛА НА СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ МАЛОНАПОЛНЕННОГО НАНОКОМПОЗИТА ПТФЭ-АМОРФНЫЙ SiO_2

В.Н. Адери́ха*, В.А. Шаповалов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, *vnad@tut.by

Введение. Изнашивание композитов ПТФЭ неизбежно сопровождается трибохимической деструкцией, одним из продуктов которой при трении во влажной воздушной атмосфере согласно Harris et al. [1] являются перфторкарбоновые кислоты (ПФК), образование которых увеличивает прочность адгезионной связи пленки переноса с поверхностью стального контртела и ее долговечность [2]. Это обеспечивает прирост износостойкости нанокompозитов ПТФЭ, наполненных $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [1, 3], до двух порядков по сравнению с трением в условиях сухого воздуха или вакуума, исключающих возможность образования ПФК ввиду отсутствия молекул воды, необходимой для реализации последней стадии образования ПФК — гидролиза концевых фторангидридных групп в карбоксильные [1]. Аналогичная связь между скоростью изнашивания и относительной влажностью окружающего воздуха была подтверждена, в частности, при изнашивании другого композита ПТФЭ, наполненного терморасширенным графитом, а также нанокompозита на основе сополимера PFA (сополимера тетрафторэтилена и перфторалкилового эфира) и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Цель работы — оценить влияние химического состава поверхности стального контртела на процессы трибоокисления и скорость изнашивания малонаполненного композита ПТФЭ.

Объекты и методы исследований. Образцы композита ПТФЭ, наполненного 2 мас.% аморфного кремнезема марки Newsil (КНР), получали свободным спеканием на воздухе при 375°C сухих порошковых композиций, таблетированных при 50 МПа. Скорость изнашивания по стали 40X и 40X13 определяли при скорости 0,17 м/с и давлении 2 МПа по схеме трения вал-частичный вкладыш. Процессы окисления поверхности трения композитов изучали методом ИК-спектроскопии, модельные составы анализировали с помощью ДТА.

Результаты и обсуждение

Трибологические испытания показали, что скорость изнашивания композита ПТФЭ- SiO_2 по стали 40X в 3 раза ниже, чем по стали 40X13 и составляет, соответственно, $\approx 2,5$ и $7,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, что, согласно данным ИК-спектроскопии, сочетается с повышенным содержанием продуктов трибоокисления ПТФЭ в поверхностном слое при трении композита по стали 40X и согласуется с представлениями о положительном влиянии трибоокисления на износостойкость композитов ПТФЭ.

Усиленное окисление при трении по стали 40X было отнесено к снижению механической прочности пленки оксидов железа, облегчающей перенос и внедрение оксидов железа (являющихся сильным окислителем), и фрагментов пленки переноса с контртела на композит. В случае нержавеющей стали 40X13 интенсивность этих процессов ограничивается высокой механической прочностью тонкого наружного слоя оксидов хрома, ингибирующего окисление стали и тормозящего окисление и закрепление пленки переноса и обратный перенос. Результаты ДТА на воздухе компактированных порошков ПТФЭ и его модельных 50% смесей с оксидами показали (рис.), что нано- Fe_3O_4 значительно ускоряет окисление ПТФЭ, и, вероятно, повышает этим износостойкость композитов. Проверка показала, что введение 0,5 мас.% Fe_3O_4 в композит ПТФЭ / 2 мас.% SiO_2 снижает скорость его изнашивания до ≈ 4 и ≈ 8 раз при трении по стали 40X13 и 40X соответственно.

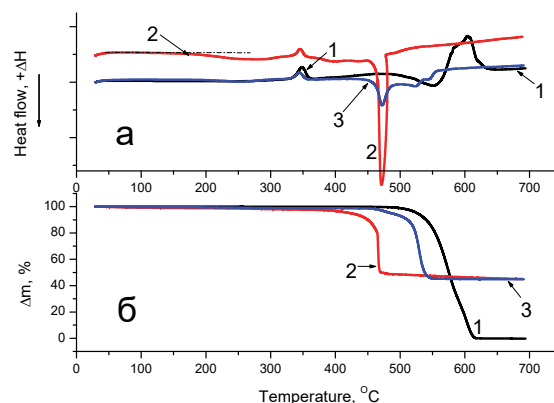


Рис. Зависимость изменений энтальпии (а) и массы (б) компактированных порошков ПТФЭ (1) и его смесей (1/1) с ультрадисперсными порошками Fe_3O_4 (2) и Cr_2O_3 (3) от температуры. Кривая 2 (а) смещена для наглядности.

1. Harris K.L., Pitenis A.A., Sawyer W.G., Krick B.A., Blackman G.S., Kasprzak D.J., Junk C.P., PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films // *Macromolecules* – 2015 (48), № 11, 3739–3745
2. Ye J., Burris D. L. and Xie T. A Review of Transfer Films and Their Role in Ultra-Low-Wear Sliding of Polymers // *Lubricants* – 2016 (4), №4; doi:10.3390/lubricants4010004
3. Krick B.A., Ewin J.J., Blackman S., Junk C.P., Sawyer W.G. Environmental dependence of ultra-low wear behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) and alumina composites suggests tribochemical mechanisms // *Trib. Int.* – 2012 (51), 42–46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКЕ МЕТОДОМ РАЗРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

С.С. Дубенец

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

Постановка цели. Определение удельной силы трения при поперечной прокатке является одной из главных задач в исследовании процесса деформации.

При поперечной прокатке, процесс трения происходит на контактных поверхностях инструмента и прокатываемого образца. Энергия от деформирующего инструмента передаётся металлу исключительно за счёт сил трения, в этой связи, исследование данного параметра становится первоочередным.

Материалы и методы. Контактные напряжения определялись методом разрезного инструмента. Суть метода заключается в прокатке цилиндрических образцов между плоскопараллельными плитами. Образец представляет из себя предварительно нагретый до температуры 900—1200 °С пруток, диаметром 20 мм. Частота вращения образца в процессе деформации изменялась с 10 до 50 с⁻¹. Для выполнения условия плоскодеформированного состояния в центральной части заготовки, соотношение длины заготовки к диаметру принималось больше двух.

Схема экспериментальной оснастки для определения контактных напряжений представлена на рис. 1 [1]. Оснастка представляет собой сборный инструмент, который состоит из подшипников 5, обеспечивающих измерение увеличения сил трения мессдозой 6 и измерение увеличения распорного усилия мессдозами 7. Применение высокоточного ходографа позволило контролировать перемещение инструмента с высокой точностью. Для измерения температуры использовалась термопара 3, которая была помещена в корпус 2. Фиксация корпуса осуществлялась штифтом 8.

При процессе поперечной прокатки пластического тела, развитие линий скольжения происходит в зависимости от степени обжатия. Экспериментально установлена зависимость между полями линий скольжения и распределением контактных напряжений. По результатам полученных данных экспериментально были определены зависимости коэффициентов трения между контактными поверхностями и степенями обжатия. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Результаты и их обсуждение. При степени обжатия до 1,025 реализуется местное поле линий скольжения, не пересекающее центральную часть

прокатываемого образца, также наблюдались ярко выраженные зоны отставания и опережения. При достижении степеней обжатия более 1,025 реализуется центральное поле линий скольжения, пересекающее ось заготовки. При такой степени обжатия наблюдалась только зона отставания. Увеличение степени обжатия приводит к увеличению сил контактного трения. При достижении критических значений этих сил происходит проскальзывание прокатываемого образца. Площадь контакта при этом максимально возможная. При нанесении технологической насечки, глубина впадин которой превышает слой окарины, пластическая постоянная исследуемого материала равна удельной силе трения при температуре приконтактного слоя.

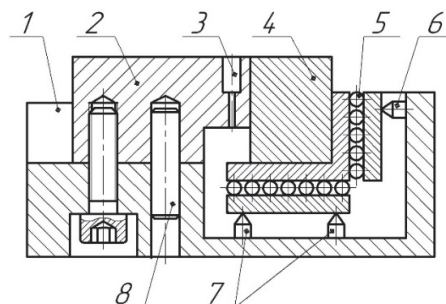


Рис. 1. Экспериментальная оснастка для определения контактных напряжений методом разрезного инструмента

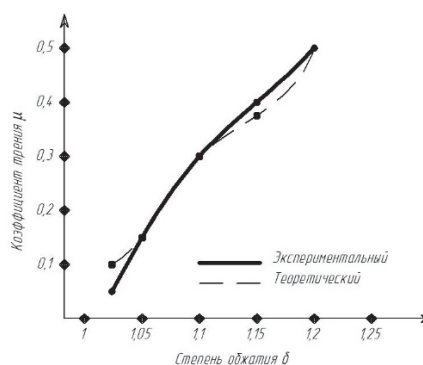


Рис. 2. Зависимость теоретического и экспериментального коэффициентов трения от степени обжатия образца (температура 1100 °С, сталь 45)

1. Шукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. — Мн.: Наука и техника, 1986. — 223с.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ С АУСФЕРРИТНО-КАРБИДНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

М.С. Ковалько¹, А.Т. Волочко¹, Р.Э. Трубицкий²

¹ Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, kovalko.m@mail.ru

² ОАО «Лидский литейно-механический завод»

При производстве изделий, работающих в условиях большого абразивного воздействия, наиболее часто используются отбеленные хромистые чугуны с высокой износостойкостью и твердостью. Содержание хрома в данных чугунах варьируется от 10 до 25%, а дополнительно вводимых легирующих элементов (никеля, молибдена, ванадия и др.) при этом также может достигать 2—3 % [1]. Учитывая, что ресурс работы данных чугунов при эксплуатации достигает в среднем 40—60 часов, за все время работы безвозмездно теряется большое количество дорогостоящих высоколегированных железоуглеродистых сплавов [2, 3]. Поэтому повышение ресурса работы данных чугунов и уменьшение их себестоимости является актуальной задачей.

Цель работы — увеличение ресурса работы износостойких чугунов путем разработки новых составов чугунов, в том числе и графитизированных с более высокими эксплуатационными свойствами, а также изучение влияния термической обработки на уровень свойств исследуемых составов чугунов.

Материалы и методы исследования

Для исследований использовали разработанный экономнолегированный чугун с шаровидной формой графита (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав чугуна

Массовая доля элементов, %									
C	Si	Mn	S	B	Mg	Ni	Cu	Mo	Cr
4,11	1,78	0,67	0,002	0,02	0,051	0,65	0,60	0,28	1,75

Термическую обработку образцов проводили посредством изотермической закалки при 300 °C в расплаве солей и среде сжатого воздуха.

Образцы для механических испытаний изготавливали в соответствии с ГОСТ 7293-85. Определение прочности проводили с использованием универсальной разрывной машины WDW-100E, твердости на твердомере ТШ-2М, ударной вязкости с использованием маятникового копра МК-30 на образцах без надреза. Износостойкость определяли на плоских образцах в соответствии с ГОСТ 23.208-79.

Металлографические исследования, распределение структурных составляющих и элементный состав матрицы чугунов определяли с использованием металлографического комплекса МИКРО 200 и СЭМ Tescan Mira 3.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура полученного чугуна в литом состоянии состоит из включений шаровидного графита средним размером 20—30 мкм и металлической перлитно-карбидной матрицы. Твердость чугуна в литом состоянии составляет 35—40 HRC. Соответственно, чугун в таком состоянии не удовлетворяет требованиям работы в ударно-абразивных условиях.

Проведение изотермической закалки с нагревом до 915 °C и последующим охлаждением до 300 °C позволяет формировать в матрице чугуна гетерогенную структуру, состоящую из аусферритной основы и включенными в ней карбидами на основе Cr, Mo и В (рис. 1). Дополнительно вводимые Ni и Cu растворяются преимущественно в твердом растворе, что позволяет повышать прокаливаемость чугуна, а также его прочностные и пластические свойства.

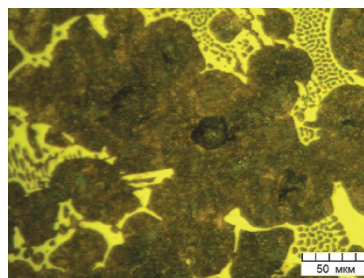


Рисунок 1. Микроструктура чугуна

При этом, после закалки чугуна твердость повышается до 60 HRC, коэффициент износостойкости на 20%, прочность и ударная вязкость на 10-30 %. Это позволяет использовать чугуны данного структурного класса взамен более дорогостоящим высоколегированным белым чугунам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ T22M-056).

1. Жумаев А.А., Барановский К.Э., Мансуров Ю.Н. Анализ микроструктуры износостойких хромистых чугунов после термической обработки. Литье и металлургия. 2021;(1):142-148.
2. Chen, Xiang & Li, Yanxiang. (2010). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron. Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing - MATER SCI ENG A-STRUCT MATER. 528. 770-775. 10.1016/j.msea.2010.09.092.
3. Laino, Sebastián & Sikora, J.A. & Dommarco, Ricardo. (2008). Development of wear resistant carbide austempered ductile iron (CADI). Wear. 265. 1-7. 10.1016/j.wear.2007.08.013.

ВЛИЯНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ТРЕНИЕ Ni-P ПОКРЫТИЯ В СЛАБОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

В.Г. Кудрицкий, Д.М. Гуцев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Республика Беларусь vladukas@mail.ru

Цель. Использование химически осажденных Ni-P покрытий находит широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря их превосходной коррозионной стойкости и износостойкости, твердости, равномерностью осаждения независимо от геометрии, а также немагнитным свойствам [1]. Введение в данное покрытие твердых смазок, таких как политетрафторэтилен (ПТФЭ), позволяет улучшить их трибологические свойства, что широко востребовано в «сухих» трибосопряжениях. Однако, в механических системах имеются приложения, где необходимо использование смазочных материалов. Кроме того, в настоящее время существует общая тенденция по снижению вредного воздействия смазочных материалов на окружающую среду, суть которой заключается в применении биоразлагаемых смазочных материалов. Таким образом, целью данной работы было исследование и расширение имеющихся знаний поведения данных покрытий в присутствии биоразлагаемых смазочных материалов.

Методика и оборудование. Исходные Ni-P покрытия, толщиной 5 мкм, формировали химическим методом на образцах из стали. Перед покрытием образцы готовили стандартным методом [2], включающим: обезжиривание, промывку, травление. Образец с покрытием подвергался термообработке, при этом твердость покрытия составила 812 МПа. (Микротвердомер Micromet 2001). Толщина покрытия была определена по EN 1071 (Устройство «KaloMAX» и оптический микроскоп ZEISS HAL 100). Были проведены сравнительные триботехнические испытания Ni-P покрытия по схеме палец–плоскость в присутствии биоразлагаемого смазочного материала и без него (Микротрибометр MTU-2K7). В качестве индентора выступал шарик диаметром 4 мм из стали ШХ15. Нагрузка на индентор менялась ступенчато и составляла 50 мН, 100 мН, 150 мН, 200 мН и 250 мН при каждом испытании. Скорость линейного перемещения — 1 мм/с, суммарная длина трека составила 5 м. После каждого шага испытаний проводилась оценка линейного износа на инденторе по диаметру пятна контакта на растровом электронном микроскопе (VEGA II LSH). После окончания всех испытаний проводилась также оценка величины линейного износа самого покрытия по ширине дорожки трения. В качестве смазочного материала использовали техническое рапсовое масло.

Результаты исследования. В результате триботехнических испытаний были получены зависимости коэффициента трения и линейного износа от нагрузок, которые представлены на рисунке 1. По-

казано значительное улучшение триботехнических характеристик при трении в присутствии смазочного материала. Установлена хорошая способность удерживать смазочный материал покрытием, которая, по всей видимости, связана с развитой градиентной морфологией покрытия. Исследование дорожек трения после трибоиспытаний на РЭМ показало возможность накопление продуктов износа во впадинах покрытия в присутствии смазочного материала. При этом значение линейного износа, определяемого по величине пятна контакта после испытания, в присутствии смазочного материала значительно ниже в сравнении с трением без него.

Отмечено более высокое значение коэффициента трения в области малых нагрузках (50 мН) со смазкой ($\mu = 0,6$) в сравнении с трением без нее ($\mu = 0,5$). Предположительно при минимальных значениях нагрузки на результат испытаний оказывает влияние вязкость масла.

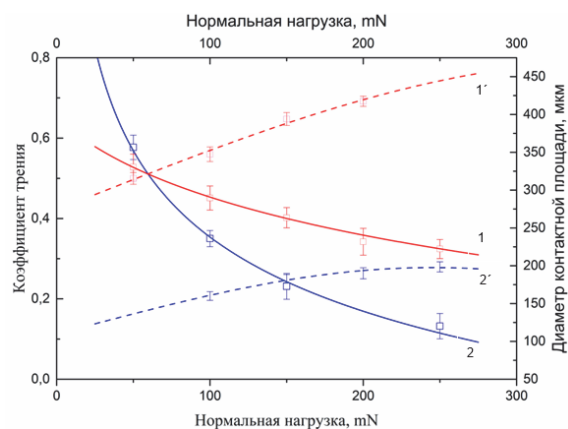


Рис. 1. График зависимости коэффициента трения от нагрузки: 1 – сухое трение, 2 – в среде смазки. Зависимость линейного износа от нагрузки: 1' – сухое трение, 2' – в среде смазки

Данные покрытия с дополнительной обработкой биоразлагаемыми смазками могут найти применение в электротехнике (электрические контакты) и пищевой промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ № T21ЭТ-018) и программы ГПНИ задание 4.2.2.

1. A. Ramalho, J.C. Miranda, Tribological characterization of electroless NiP coatings lubricated with biolubricants, *Wear* 263 (2007) 592–597.
2. Гуцев Д.М. Методика формирования Ni-P базового слоя металлополимерного антифрикционного покрытия/МИ №003-2009 ИММС НАН Беларуси, Гомель, 2009. 12 с.

СКОЛЬЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ С СИММЕТРИЧНЫМ ОРТОТРОПНЫМ ТРЕНИЕМ И ДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННОМ ЗАКОНЕ ТРЕНИЯ

Н.Н. Дмитриев¹, Е.М. Петроковец²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; dn7@rambler.ru
²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. При движении тела с центром масс, расположенным над плоскостью скольжения, происходит перераспределение контактных давлений. С этим связано понятие динамически согласованного трения, согласно которому при движении тела с плоским основанием должны выполняться общие теоремы динамики, записанные относительно осей, проходящих через центр масс. Представляет интерес рассмотрение влияния ортотропного трения на движение тела в условиях динамически согласованного трения.

Расчет давлений и сил трения. Распределение давления $p(\xi, \eta)$ можно представить в виде [1]

$$p(\xi, \eta) = p_0 + p_1 \xi + p_2 \eta. \quad (1)$$

Запишем тензор трения $\mathcal{F}$ и элементарную силу трения в виде

$$\mathcal{F} = \begin{pmatrix} f_x & 0 \\ 0 & f_y \end{pmatrix}, \quad d\mathbf{T} = -p(\xi, \eta) \mathcal{F} \frac{\mathbf{v}}{v} d\xi d\eta, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}$, v — вектор и величина скорости элементарной площадки.

Для предотвращения опрокидывания тела, сумма моментов силы трения и реакции опоры относительно перпендикулярных осей, проходящих через центр масс, должна равняться нулю (рис. 1)

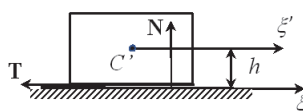


Рис. 1. Положение центра масс относительно опоры (T — сила трения, N — равнодействующая реакции опоры на тело)

Исходя из вышесказанного с учетом равенства

$$\iint_S p(\xi, \eta) d\xi d\eta = mg, \quad (3)$$

получим систему уравнений для определения p_0, p_1, p_2 . Нами было показано, что при опирании тела на круговую и кольцевую площадки распределение $p(\xi, \eta)$ зависит от направления скорости центра масс тела, параметра $\beta = v_0/\omega$ и компонент тензора трения, где v_0 и ω — скорость центра масс и его угловая скорость соответственно. Сила и момент трения определяются интегрированием выражения

$$(2) \text{ и } M_z = \iint_S \mathbf{r} \times d\mathbf{T} \text{ по области контакта.}$$

Уравнения движения и их анализ. Уравнения движения тела по плоскости в проекциях на оси естественного трехгранника записываются в виде

$$\begin{aligned} m\dot{v} &= T_\tau(p_0, p_1, p_2, \beta, \vartheta) \\ m v \dot{\vartheta} &= T_n(p_0, p_1, p_2, \beta, \vartheta), \\ I \dot{\omega} &= M_T(p_0, p_1, p_2, \beta, \vartheta) \end{aligned} \quad (4)$$

где T_τ и T_n — проекции силы трения на тангенциальную и нормальную оси, M_T — проекция момента трения относительно оси, перпендикулярной плоскости скольжения и проходящей через центр масс, ϑ — угол, определяющий направление скорости центра масс вдоль плоскости скольжения.

Отметим, что $T_\tau(p_0, p_1, p_2, \beta, \vartheta) \leq 0$, $M_T(p_0, p_1, p_2, \beta, \vartheta) \leq 0$ при любых значениях β и ϑ , $f_x, \mu = f_y - f_x$, а величина T_n при соответствующих параметрах может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Решение системы уравнений (5) методом Рунге-Кутты с различными начальными условиями и изучение финальных характеристик движения показывают, что величина угла ϑ и параметр β стремятся к решению системы

$$\beta_* - \Phi(\beta_*, \vartheta_*) = 0, \quad \Phi(\beta_*, \vartheta_*) = \frac{I_* T_\tau(\beta_*, \vartheta_*)}{M_T(\beta_*, \vartheta_*)}, \quad (5)$$

$$T_n(\beta_*, \vartheta_*) = 0$$

На рис. 2 показано обусловленное изучаемым фактором искривление траектории движения цилиндра по плоскости ($h = 0.5h_*$ и $\mu = 0; 0.21$ и 0.42).

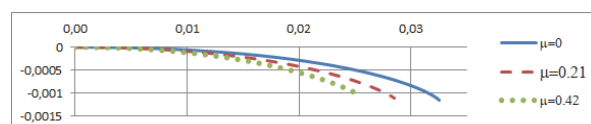


Рис. 2. Траектории центра масс цилиндра

Заключение. Особенностью движения при динамически согласованном трении является искривление траектории движения центра масс.

Триботехнические свойства волокнистой чесальной ленты

Т.В. Бувевич¹, Е.С. Максимович², В.Н. Сакевич¹¹Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Беларусь; igsakevich@yandex.ru²Отделение по сбыту электрической энергии Минского района филиала «Энергосбыт» РУП «Минскэнерго»

Работа посвящена оптимизации триботехнических свойств волокнистой чесальной ленты для производства искусственного меха. Искусственный мех по своему строению напоминает натуральный и состоит из грунта и ворса. Грунт — основа меха, в которой закреплены волокна ворса. Ворс — волокнистый покров. Технология производства искусственного меха включает процесс изготовления волокнистой чесальной ленты. Чесальная лента производится по следующей схеме: первичное разрыхление и смешивание волокон, послойное смешивание и рыхление волокон, эмульсирование волокон, чесание волокон и формирование. Одной из проблем текстильных предприятий является определение и обоснование требуемого расхода эмульсии для нанесения на волокна чесальной ленты при производстве искусственного меха.

Постановка задачи. В работах [1, 2] были рассмотрены общие закономерности трения волокнистых материалов и показано влияние концентрации и свойств текстильно-вспомогательных веществ на фрикционные свойства волокон и нитей. Характер изменения динамического коэффициента трения в зависимости от концентрации препарата на поверхности волокна представлен на рис. 1, б [2].

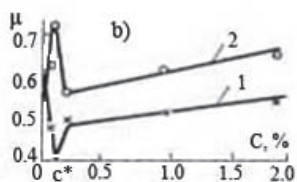


Рисунок 1, б — Зависимость коэффициента трения μ от концентрации C , % поверхностно-активного препарата на поверхности волокна: 1 — изменение динамического коэффициента трения; 2 — изменение коэффициента тангенциального сопротивления; C^* — концентрация, соответствующая образованию мономолекулярного слоя

Согласно зависимостям, представленным на рисунке 1, б, существует оптимальное количество поверхностно-активного препарата на поверхности волокна, при котором коэффициенты трения μ имеют экстремумы: динамический коэффициент трения при движении волокна по металлу имеет минимум, а коэффициент тангенциального сопротивления при движении волокна по волокну — максимум [2].

Цель работы — установить влияние количества наносимого на волокна чесальной ленты эмульсола ИС-2 на показатели качества искусственного меха и провести оптимизацию его расхода по показателям качества искусственного меха.

Результаты и их обсуждение. Исследовано

влияние количества наносимого на волокна чесальной ленты эмульсола ИС-2 на показатели качества искусственного меха, такие как поверхностная плотность ворсового покрова, масса слабо закрепленных волокон, удельное поверхностное электрическое сопротивление, устойчивость к сваливанию ворса и прочность ленты [3]. Установлены механизмы влияния замасливателя на динамический коэффициент трения и коэффициент тангенциального сопротивления волокнистой чесальной ленты и проведена оптимизация расхода, наносимого на волокна эмульсола по достижению максимальных показателей качества искусственного меха.

Выводы. Экспериментально подтверждено, что как динамический коэффициент трения, так и коэффициент тангенциального сопротивления волокон могут значительно изменяться в зависимости от концентрации текстильно-вспомогательных веществ на поверхности волокнистых материалов чесальной ленты: возникают различные зоны трения, обусловленные разным режимом взаимодействия двух трущихся поверхностей. Проведена оптимизация расхода наносимого эмульсола (концентрация эмульсола 2 г на 1 кг волокна для меха Н-32 и И-59, а для меха И-81 — 3 г на 1 кг волокна) на волокно по показателям качества искусственного меха. Результаты проведенных исследований показали, что применение замасливания волокон в оптимальной концентрации (2—3 г/кг в зависимости от меха) безжировым эмульсом ИС-2 при производстве искусственного меха ведет к увеличению массы ворсового покрова (компактности ленты) от 5,4% до 19%, к существенному уменьшению от 77,8% до 81,3% массы слабо закрепленных волокон в ворсе, снижению показателя удельного поверхностного электрического сопротивления от 22,6% до 45,4% в зависимости от вида меха. На устойчивость ворса к сваливанию концентрация эмульсола ИС-2 не влияет. Также при оптимальной концентрации эмульсола достигается наибольшая прочность ленты с минимальным коэффициентом вариации.

1. Howell H., Meiszis H., Tabor D. Friction in Textiles. Butterworth, London. 1959.
2. Пакшвер, А.Б., Мельников Б.Н., Усенко В.А., Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Свойства и особенности переработки химических волокон. Под ред. А.Б.Пакшвера. Москва Химия 1975г. 496 с.
3. Сакевич, В.Н. Влияние замасливания волокон безжировым эмульсом на показатели качества искусственного меха / В.Н. Сакевич, Е.С. Посканная // Вестник Витебского государственного технологического университета. — 2016. — № 1(30). — С. 99-104.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫМИ СМАЗКАМИ, АКТИВИРОВАННЫМИ МОЩНЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ

Т.В. Бувевич¹, Е.С. Максимович², В.Н. Сакевич¹

¹Витебский государственный технологический университет, Беларусь: igsakevich@yandex.Ru

²Отделение по сбыту электрической энергии Минского района филиала «Энергосбыт» РУП «Минскэнерго»

Работа посвящена регулированию фрикционных и электрофизических свойств волокнистых материалов путем применения замасливателей, активированных мощным ультразвуковым воздействием. Фрикционные характеристики волокон оказывают существенное влияние на эффективность их текстильной переработки. Наиболее значимыми для технологических процессов текстильного производства фрикционными характеристиками волокна являются статический и динамический коэффициенты трения [1, 2]. Статический коэффициент трения характеризует силы сцепления элементарных волокон в чесальной ленте или нити между собой в состоянии покоя и отвечает за их прочность при растяжении. Совместное проявление трения и цепкости называется тангенциальным сопротивлением. Динамический коэффициент трения влияет на сопротивление движению текстильных нитей по металлу. Для повышения прочности, снижения динамического коэффициента трения, придания антистатических свойств в текстильном производстве предусматривается процесс поверхностной модификации волокнистых материалов. Такой модификацией является обработка замасливающими смазками [1, 2]. Разработаны новые составы эмульсолов и способы их получения [3, 4]: IS-1 на основе масел и безжировой эмульсол IS-2 на основе эфира метилового жирных кислот. Особенностью новых эмульсолов является то, что при растворении их в воде образуются устойчивые прямые микро-эмульсии (типа «масло в воде»).

Цель работы — анализ триботехнических и антистатических свойств текстильных волокнистых материалов при поверхностной обработке эмульсионной смазкой, модифицированной мощным ультразвуковым воздействием.

Материалы. Для проведения испытаний были выбраны следующие образцы волокон: вискоза 100 %, с линейной плотностью 30 Текс; полиэфир 100 %, с линейной плотностью 34 Текс; хлопок 100 %, с линейной плотностью 20 Текс; лен 100 %, с линейной плотностью 58 Текс; полиэфир 50 % в смеси с хлопком 50 %, с линейной плотностью 65 Текс.

Результаты исследований и их обсуждение. Применение эмульсола IS-2 уменьшило динамический коэффициент трения для всех образцов в диапазоне от 10,3 % до 69,9 %. Коэффициент тангенциального сопротивления волокон, который влияет на разрывную нагрузку (прочность) и удлинение нити,

увеличился для льна на 50,6 % и шерсти — на 15,3 %. Для полиэфира и хлопка коэффициент тангенциального сопротивления уменьшился на 5,5 % и на 25,9 % соответственно. Отмечено, что независимо от материала образца динамический коэффициент трения всегда меньше коэффициента тангенциального сопротивления. Поверхностное электростатическое сопротивление уменьшилось для всех образцов на 3—4 порядка, и незначительно для льна (в 2,8 раза).

Выводы. Разработанные эмульсолы позволяют существенно снизить стоимость конечного продукта, как за счет использования более дешевого сырья, так и за счет менее трудоёмкой и энергоёмкой технологии, повышения производительности процесса, а также расширить сырьевую базу их производства.

Исследования влияния на фрикционные свойства текстильных волокнистых материалов поверхностной обработки эмульсионной смазкой, модифицированной мощным ультразвуковым воздействием, показали её эффективность по параметрам назначения в основном за счет уникальных свойств образующихся микроэмульсий.

Разработанный эмульсол IS-2 на основе эфира метилового жирных кислот может быть рекомендован для замасливания широкого ассортимента волокнистых материалов взамен более дорогих эмульсолов и имеющих локальный спектр применения. Для применения при производстве железобетонных изделий в виде разделительной смазки с целью удешевления можно эмульсол изготавливать на основе нефтяного экстракта [5].

1. Генис, А. В. Роль замасливателей в современных процессах получения химических волокон и наполненных полимерных материалов / А. В. Генис // Пластические массы. — 2013. - №3. - С.24-30.
2. Степанова, Т. Ю. Эмульсирование как способ модификации свойств поверхности текстильных волокон: монография / Т. Ю. Степанова // Ивановский государственный химико-технологический университет. — Иваново, 2011. — 118 с.
3. Максимович Е.С., Павлов В.М., Сакевич В.Н. Эмульсол и способ его получения. Патент РБ на изобретение №17966 от 2013.10.30.
4. Толкач А. П., Сакевич В. Н., Посканная Е. С. (2017), Замасливатель IS -2, ТУ BY 100006975.024-2016, Введ. 2017. - 21.-03, 13 с.
5. Максимович Е.С. Влияние ультразвуковой обработки на свойства эмульсионных смазок для опалубки при производстве сборного и монолитного железобетона / Е.С. Максимович, В.Н. Сакевич // Журнал "Вестник ПГУ" №8, 2012г. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. с.78-84.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПЛАКИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

М.А. Леванцевич¹, В.Л. Басинюк¹, С.И. Платов²

¹Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; levancev@mail.ru

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Введение. Известно, что при строительстве и последующей эксплуатации нефтегазовых скважин серьезную проблему представляют резьбовые соединения насосно-компрессорных труб (НКТ), к которым предъявляют жесткие требования по обеспечению высокой износо и коррозионной стойкости. Одним из путей решения этой проблемы является формирование на резьбовых поверхностях защитных покрытий. Экспериментальными исследованиями установлено, что покрытия на основе сплава меди и цинка, сформированные методом деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), хотя и выдерживают требуемое число циклов «свинчивание-развинчивание», однако имеют сравнительно невысокую коррозионную стойкость [1].

Цель исследований заключалась в оценке коррозионной стойкости различных по составу покрытий, сформированных методом ДПГИ, и определении рационального состава покрытия для последующей защиты резьбовых поверхностей НКТ.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – покрытия из композиций на основе сплавов Cu+Zn, Al+Zn, Al+Zn+Cu Cr+Ni, Cr+Ni+Cu+Zn, Cr+Ni+Al+Zn, Cr+Ni+Al+Zn+Cu. Образцы – цилиндрические стержни диаметром 15 и длиной 70 мм, выполненные из стали 45, объемной закалки (HRC 43—45) с покрытием на образующих поверхностях ($Ra = 0,9—1,4$ мкм) толщиной 10—16 мкм на сторону.

Оценку коррозионной стойкости образцов выполняли в камере соляного тумана при концентрации водно-соляного раствора NaCl 30%, в соответствии с ГОСТ 9.905-2007. Температура окружающего воздуха — 22—23 °C.

В качестве критерия оценки коррозионной стойкости принималось время до возникновения первых очагов коррозии. Выявление очагов коррозии осуществляли визуально путем периодического осмотра поверхности образцов вначале через 1 час, затем через каждые 30 минут после их извлечения из камеры.

Результаты и их обсуждение. На основе анализа результатов исследований установлено, что первые очаги коррозии возникли через 1 час 30 мин у образцов без покрытия. Через 4 часа коррозионные повреждения выявлены у образцов с покрытиями Cu+Zn, Al+Zn, Al+Zn+Cu, Cr+Ni, Через 6 часов — у образцов

с покрытиями Cr+Ni+Cu+Zn, Через 9 часов 30 мин — у образцов с покрытиями Cr+Ni+Al+Zn, Cr+Ni+Al+Zn+Cu.

На основании результатов проведенных исследований было принято решение о том, что для защиты поверхности резьбовых соединений НКТ от коррозии предпочтительнее использовать покрытия из композиции типа Cr+Ni+Al+Zn+Cu. Эта композиция, дополнительно к обеспечению коррозионной защиты, может способствовать и улучшению антифрикционных свойства покрытий за счет повышенного содержания меди (до 40%). В связи с чем, для проведения испытаний были изготовлены натурные образцы резьбовых соединений НКТ с покрытием (рис 1)



Рис. 1. Фото натурных образцов ниппелей НКТ и соединительных муфт с покрытием на резьбовых поверхностях

Заключение. В условиях проводимых испытаний наилучшие результаты по обеспечению коррозионной стойкости показали покрытия из композиций Cr+Ni+Al+Zn и Cr+Ni+Al+Zn+Cu. По сравнению с образцами без покрытия время появления первых очагов коррозии на поверхности этих образцов увеличилось, почти, в 6 раз.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T21ЭТ-005).

1. Белевский Л.С. Испытания покрытий на муфтонаверточной машине, полученных фрикционным плакированием / Л.С. Белевский, Ю.Ю.Ефимова, Р.Р. Дема., С.И. Платов., В.Л. Басинюк., П.А. Витязь., М.А.Леванцевич, Н.А. Девятерикова // Тяжелое машиностроение. 2021. №7 – 8/2021. С. 39-44.

Трибологические свойства в вакууме и при повышенной температуре покрытий из дисульфида молибдена, нанесенных магнетронным напылением

М.В. Прожега, Е.О. Решиков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия; info@imash.ru

Введение. Покрытия из дисульфида молибдена применяются в экстремальных условиях эксплуатации, где использование жидких смазочных материалов неэффективно: при высоких или, наоборот, низких температурах эксплуатации трибосопряжения, высоких контактных давлениях и др. Например, в космических аппаратах, печах, узлах трения криогенной техники, в термоядерных реакторах [1, 2].

Существует множество различных способов нанесения твердосмазочных покрытий на поверхность деталей пар трения, к которым относятся: окрашивание, плазменные и химические методы осаждения (PVD и CVD). В настоящее время широко используют магнетронное напыление [2-3].

Режимы напыления, способ подготовки и состояние поверхности перед нанесением покрытия оказывают влияние на трибологические свойства покрытий: коэффициент трения и ресурс. Ресурс антифрикционного покрытия зависит от множества факторов и оценка этого параметра затруднительна. Для прогнозирования долговечности покрытия дисульфида молибдена необходимо проводить специальные длительные испытания в условиях эксплуатации разрабатываемого покрытия [4].

В работе исследовали коэффициент трения и ресурс покрытий из дисульфида молибдена, нанесенных магнетронным напылением на подложку из стали и бронзы при повышенной температуре в вакууме.

Цель — определение влияния способа подготовки поверхности и условий магнетронного напыления покрытий на основе дисульфида молибдена на ресурс и коэффициент трения.

Материалы и методы. Образцы коррозионно-стойкой, жаростойкой, жаропрочной стали аустенитного класса (08X16H11M3) и безоловянной литейной бронзы (БрА9ЖЗЛ), применяемой при изготовлении антифрикционных деталей, перед нанесением покрытия из дисульфида молибдена подвергали шлифованию, пескоструйной обработке или оставляли без обработки в состоянии поставки — прокат.

Режимы напыления подбирали таким образом, чтобы получить бездефектное сплошное покрытие толщиной 5—7 мкм.

Образцы с нанесенными покрытиями исследовали на сканирующем электронном микроскопе и методом рентгенофазового анализа для определения

структуры, оценивали адгезионную прочность при помощи скрэтч-тестирования. Трибологические исследования включали в себя кратковременные (30 мин) тесты для определения коэффициента трения и длительные испытания на ресурс в условиях вакуума и температуры 250 °С по схеме возвратно-поступательного перемещения индентора — стального шарика диаметром 6 мм в соответствии со стандартом ASTM G133. Поверхность образцов и химический состав покрытия изучали до и после трибологических испытаний.

Результаты и их обсуждение. С увеличением шероховатости поверхности образцов перед нанесением увеличивается адгезионная прочность покрытий, определенная по результатам скрэтч-тестирования.

При этом при увеличении адгезионной прочности ресурс покрытий не увеличивается.

Значение коэффициента трения, которое наблюдали во время длительных испытаний на ресурс выше, чем значение, полученное по результатам кратковременных испытаний. Колебания коэффициента трения во время длительных испытаний может в два раза превосходить среднее значение.

Образцы покрытий, которые при испытании на ресурс разрушились, содержали наибольшее количество кислорода.

Заключение. Для точного определения ресурса антифрикционных покрытий из дисульфида молибдена и коэффициента трения в процессе эксплуатации следует проводить длительные испытания в условиях максимально приближенных к условиям работы покрытий.

1. Shengyu Zhu, Jun Cheng, Zhuhui Qiao, Jun Yang, High Temperature Solid-Lubricating Materials: A Review // Tribology International – 2019 (133), 206-223
2. Seynstaahl, A.; Krauß, S.; Bitzek, E.; Meyer, B.; Merle, B.; Tremmel, S. Microstructure, Mechanical Properties and Tribological Behavior of Magnetron-Sputtered MoS₂ Solid Lubricant Coatings Deposited under Industrial Conditions // Coatings – 2021 (11), 455
3. Хрущов М.М. Хромуглеродные покрытия с различным типом нанокompозитной структуры, полученные магнетронным распылением, и их свойства // Трение и износ. — 2022 (43), № 1, 59—76
4. Prozhega M.V., Reschikov E.O., Kharkov M.M., Rykunov G.I., Kaziev A.V., Kukushkina M.S., Kolodko D.V., Stepanova T.V. Estimation of MoS₂ Coating Performance on Bronze and Steel in Vacuum at High Temperatures // Coatings – 2022 (12), № 2, 125

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ К ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЕ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ф.А. Григорьев, Д.М. Гуцев, И.Н. Ковалёва, Н.К. Мышкин

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, grigoriev.feodor@gmail.com

Введение. Высокие тепловые воздействия в технологических процессах получения пластичных смазочных материалов на основе растительных масел увеличивает интенсивность их окисления, что существенно ухудшает физико-механические и триботехнические показатели конечного продукта [1]. Одним из путей решения этой проблемы, является введение антиокислительных присадок в дисперсионную среду [2,3].

Цель исследований. Изучить влияние антиокислительной присадки на химические, физико-механические и триботехнические характеристики пластичных смазочных материалов с дисперсионной средой из растительного сырья.

Материалы и методика эксперимента. В качестве объектов исследования был выбран пластичный смазочный материал на основе кальциевого загустителя и технического рапсового масла. В качестве антиокислительной присадки использовался дифениламин (ДФА). Для лучшего диспергирования модификация смазочных композиций осуществлялась на начальном этапе технологического процесса изготовления смазок, т.е. фактически модифицировалось исходное сырье. Были подготовлены образцы с концентрациями ДФА 0,1; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0 мас.%. Для сравнительных целей был выбран ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6467-74, далее Ц201).

Результаты исследования. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

По сравнению со стандартным образцом смазки ЦИАТИМ-201, смазочные материалы с дисперсионной средой из рапсового технического масла превосходят по таким параметрам как показатель износа, температура каплепадения и коллоидная стабильность, но существенно хуже проявляют себя при определении предела прочности на сдвиг, а также в них существенно большая концентрация свободных кислот.

Как видно из табл. 1, добавление ДФА в смазочную композицию существенно не изменяет показатель износа. Но при введении 0,1 мас.% заметно снижение температуры каплепадения по сравнению со смазкой без добавления присадок. При добавлении 0,5 и выше мас.% ДФА, наблюдается сильное снижение предела прочности на сдвиг, фактически, уменьшается вязкость смазочных композиций. Снижение содержания свободных кислот в смазочных материалах заметно при введении 1,0; 5,0 и 10,0 мас.% ДФА.

Таблица 1 – Химические, физико-механические и триботехнические свойства смазочных композиций

Смазочный материал	Параметры					
	Содержание свободных щелочей в пересчете на NaOH, %	Содержание свободных кислот, мгKOH/г	Предел прочности на сдвиг при 50°C, Па	Коллоидная стабильность, %	Температура каплепадения, °C	Показатель износа, мм
Ц201	0,041	–	663	22	201	1,06
K15Pт	–	1,648	118	21	237	0,87
K15Pт0,1 ДФА	–	3,561	116	12	210	0,86
K15Pт0,5 ДФА	–	2,5	52	15	175	0,9
K15Pт1ДФА	–	1,471	88	20	208	0,88
K15Pт3ДФА	–	2,323	63	12	210	0,93
K15Pт5ДФА	–	1,575	63	12	221	1,02
K15Pт10 ДФА	–	1,385	61	10	213	0,97

Сильный разброс значений и невыраженное влияние концентрации присадки может быть обусловлено тем, что антиокислительная присадка вводилась на раннем этапе технологического процесса. Высокое температурное воздействие в ходе технологического процесса вероятно нивелировало действие присадки, разрушив межмолекулярные связи, образованные ДФА и свободными жирными кислотами.

В дальнейших исследованиях предлагается изучить влияние антиокислительной присадки ДФА, введенной на заключительных этапах технологического процесса изготовления пластичного смазочного материала, где температурные режимы намного ниже.

1. Григорьев Ф.А. Подбор дисперсионной среды из растительного сырья для пластичных смазочных материалов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: тез. XXII междунар. Науч.-техн. Конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых / ГГТУ. – Гомель, 2022. – в печати.
2. И.Г. Фукс. Пластичные смазки — М.: Химия. — 1972
3. И.Г. Фукс. Добавки к пластичным смазкам — М.: Химия. — 1982

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ОКСИДОВ (ПЫЛИ ГАЗООЧИСТОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ) НА ФРИКЦИОННО-ИЗНОСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.К. Меринов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vitali.merinov@gmail.com

Введение. Одной из актуальных задач современного материаловедения является повышение эксплуатационных характеристик полимерных композитов, что достигается, в том числе, применением наполнителей различной природы и размерности [1]. Перспективным направлением в создании фрикционных композитов является использование в их составе различных веществ, образующихся в результате производственной деятельности. На металлургических предприятиях образуется значительное количество различного рода отходов. К числу наиболее массовых относятся дисперсные продукты, уловленные в системах очистки в виде пыли. Металлургическая пыль ПГУ имеет достаточно стабильный элементный и фракционный состав и представляет собой однородную механическую смесь, состоящую преимущественно из сферических частиц оксидов металлов (в основном железа и цинка) размером не более 1 мкм.

Целью работы является исследование возможности использования пыли ПГУ в качестве комплексного дисперсного наполнителя композитных материалов на основе термостойких полимеров для улучшения триботехнических параметров узлов трения.

Материалы и методы. В качестве термостойких полимерных матриц композитов использовали фторопласты Ф4 (ГОСТ 10007), Ф40 (ТУ 301-05-17-89), и полимерную композицию Ф4К20 (ТУ 6-05-1412-76). В качестве наполнителей использовалась смесь минеральных волокон, углеродного наполнителя, и пыль ПГУ. Содержание минерального волокна и во всех композитах было фиксировано, содержание пыли ПГУ варьировалось от 0 до 10 мас.%. Результаты испытаний сравнивали с коммерческим композитом (ТУ ВУ 400084698.322-2022), содержащим оксид меди. Фрикционно-износные испытания проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал-частичный вкладыш». Материал контртела — сталь марки ст.45 с твердостью до 50 HRC и шероховатостью поверхности трения $Ra = 0,52$ мкм. Приработка композитов проводилась до достижения фактической площади фрикционного контакта не менее 90 % от контурной площади. Температура окружающей среды во время испытаний находилась в пределах $T = 22\text{—}24$ °С. После приработки и каждого испытания поверхность ме-

таллического контртела очищалась от пленки переноса. Фрикционно-износные испытания проводились при удельной нагрузке $P = 2$ МПа и скорости скольжения 1 м/с.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов фрикционно-износных испытаний показал, что с увеличением содержания пыли ПГУ происходит повышение коэффициента трения композитов на основе матрицы Ф40, и понижение для композитов на основе Ф4К20. Стабильность коэффициента трения составляла 0,95—0,98. Наибольшей износостойкостью обладают композиты на основе матрицы Ф4К20. Наибольшая температура в области фрикционного контакта характерна для композитов на основе полимерной матрицы Ф40, наименьшая — полимерной матрицы Ф4. Наиболее близким аналогом к коммерческому композиту по триботехническим характеристикам оказался композит на основе Ф4К20.

Таким образом, проведенные триботехнические испытания показали, что пыль ПГУ является перспективным наполнителем для использования в полимерных фрикционных композитах, предназначенных для работы в узлах стационарного трения.

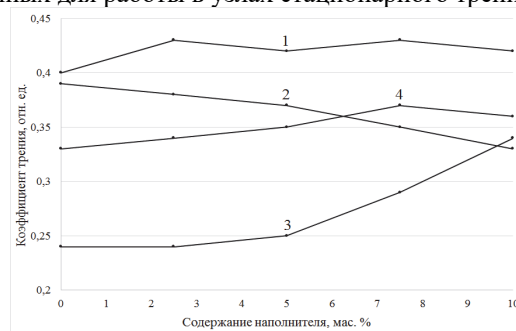


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от содержания пыли ПГУ для фрикционных композитов на основе различных полимерных матриц: 1 — Ф4; 2 — Ф4К20; 3 — Ф40; 4 — коммерческий образец, наполненный оксидом меди

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ по программе «Наука электротранспорту» договор №Т21ЭТ-015.

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие. / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин [и др.]; под ред А.А. Берлина. — СПб.: Профессия, 2008. — 560 с.

ВЛИЯНИЕ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ НА ФРИКЦИОННО-ИЗНОСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ И ШУМООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ТРЕНИИ

В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.В. Кожушко, В.К. Меринов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; sbuharov@mpri.org.by

Введение. Накопленный к настоящему времени опыт эксплуатации электромобилей показал существенные отличия в работе тормозной системы электромобилей от автомобилей с ДВС. В первую очередь отмечается усугубление зависимости эксплуатационных свойств тормозной системы от стиля вождения. Так в случае «агрессивного» характера езды происходит более интенсивный износ фрикционных пар из-за того, что электромобили, постоянно снаряженные массивной батареей, являются, как правило, более тяжелыми, чем автомобили с ДВС. Другая типичная ситуация имеет место при спокойном стиле вождения, когда преимущественно используется рекуперативное торможение. В этом случае механическая тормозная система может фактически не использоваться в течение нескольких недель. Это приводит к значительной коррозии и необходимости более частых ревизий и ремонтов тормозной системы. Кроме того, образующиеся в результате коррозии частицы Fe_2O_3 влияют на шумовую характеристику тормозов [1].

Для решения данной практически важной задачи предлагается введение комплексных ингибиторов коррозии в составы полимерных фрикционных композитов. Наличие ингибиторов в зоне фрикционного контакта снижает скорость коррозии пары трения и вероятность появления шума тормозной системы.

Цель работы — исследование влияния ингибиторов коррозии, вводимых в состав полимерного фрикционного композита на фрикционно-износные и шумовые характеристики пар трения.

Материалы и методы. В качестве контртела использовали сталь 45 в виде дисков диаметром 30 мм с шероховатостью $R_a = 3,2$ мкм. Составы фрикционных композитов содержали 1,5 и 3 мас.% ингибитора коррозии порошкового типа. Для формирования плёнок переноса диски прошли фрикционные испытания в течение 150 минут по схеме «плоскость-плоскость» при давлении 1 МПа. Линейная скорость на периферии диска составляла 0,8 м/с. Затем контртела подвергались климатическим воздействиям в течение 4-х суток по следующему циклу: нагрев до 55 °С и выдержка 16 ч, охлаждение до 20 °С и выдержка 8 ч. Влажность составляла от 95% до 100%. После сушки контртел выполнены испытания с использованием системы анализа трибоакустических характеристик фрикционных материалов и смазок MFT-5000 (Rtec Instruments) по кинематической схеме трения «плос-

кость—плоскость» при линейном возвратно-поступательном (циклическом) скольжении без смазочного материала.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов износных испытаний показал, что коррозия поверхности металлического контртела приводит к росту скорости изнашивания с 0,018 мм/ч до 0,06 мм/ч (приблизительно в 3,3 раза). Введение ингибитора в составы фрикционных композитов в концентрации 1,5 и 3 мас.% обеспечивает снижение скорости изнашивания пары трения до 0,04 и 0,05 мм/ч, соответственно. Результаты акустических измерений для полосы частот от 50 Гц до 25 кГц представлены на рис.1. Пара трения с исходным (без коррозии и плёнок переноса) стальным контртелом демонстрирует максимальный уровень шума, превышающий 55 дБ в измеряемой полосе с локальным максимумом на 9,3 кГц. Для контртел с плёнками переноса, содержащими ингибиторы, уровень шума снижается. Минимальный уровень шума отмечается для образца содержащего 3 мас.% ингибитора.

Таким образом, проведенные трибоакустические исследования показали, что введение ингибитора коррозии в состав полимерного композита позволяет снизить скорость изнашивания и шумообразование в парах трения со стальным контртелом.

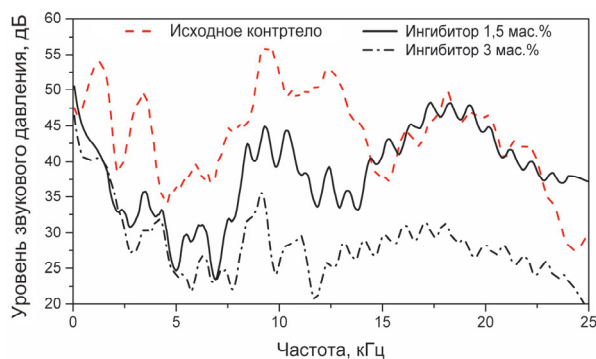


Рис. 1. Шумовые спектры, полученные в процессе фрикционно-износных испытаний

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ по программе «Наука электротранспорту» договор №Т21ЭТ-015.

1. Noh H. J. and Jang H. Friction instability induced by iron and iron oxides on friction material surface // Wear. – 2018 (**400–401**), 93–99.

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА С ТРЕНИЕМ В РАМКАХ МОДЕЛИ ВИНКЛЕРОВА ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ

Е.В. Коднянко¹, Д.А. Черноус²

¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь. onti@sipr.by.

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. В настоящее время в конструкциях различных машин и механизмов широко используются детали с полимерными покрытиями. В большинстве случаев толщина этих покрытий достаточно мала, что позволяет при решении контактных задач использовать упрощенную модель Винклера основания [1]. При отсутствии в зоне сцепления контактирующих тел горизонтальных (в плоскости области контакта) смещений данная модель не позволяет получить расчетные оценки сдвигового контактного напряжения. Вместе с тем, до настоящего времени остается не решенным вопрос о возможности подобного расчета для подвижного контакта. В связи с этим целью настоящего исследования является разработка расчетной методики, позволяющей в рамках модели Винклера основания определить контактные давления и сдвиговые контактные напряжения при качении ролика с тонким полимерным покрытием.

Описание расчетной методики. Опора качения с полимерным покрытием моделируется абсолютно жестким цилиндром с деформируемым ободом. Обод образован изотропным линейно упругим материалом и адгезионно связан с поверхностью цилиндра. Рассматривается стационарное качение составного цилиндра по недеформируемой опорной поверхности в ведомом режиме. При этом к центру масс цилиндра приложены вертикальная сила P , нормальная к опорной поверхности, и горизонтальная сила F , параллельная этой поверхности. В области контакта выделяются зоны сцепления и проскальзывания. В зоне сцепления выполняется условие неизменности продольной осевой компоненты тензора деформаций. В зоне проскальзывания для сдвигового напряжения выполняется закон трения Кулона. При решении контактной задачи для деформируемого обода используется обобщенная модель Винклера основания [1]. При этом вычисляется коэффициент нормальной жесткости, определяющий зависимость контактного давления от вертикального смещения точек поверхности обода в области контакта, а также — коэффициент сдвиговой жесткости, определяющий зависимость сдвигового напряжения в области контакта от горизонтального смещения.

Полученные аналитические зависимости сопоставлены с результатами использования точного решения краевой задачи теории упругости для слоя

произвольной толщины [2]. Данное решение подразумевает применение интегрального преобразования Фурье и последующего решения интегрального уравнения. Для рассматриваемого процесса качения точное решение может быть реализовано только численно.

Расчетный пример. В расчетном примере использования разработанной методики были использованы исходные данные, соответствующие ролику скипа, перемещающегося по проводникам скипо-клетового ствола №2 1РУ ОАО «Беларуськалий» [3]. На рисунке 1 представлены результаты расчета максимального сдвигового напряжения. Толщина обода h отнесена к полуширине области контакта a . Можно отметить приемлемую степень соответствия расчетных оценок, полученных на основе разработанной методики, результатам использования точного решения задачи теории упругости для слоя произвольной толщины.

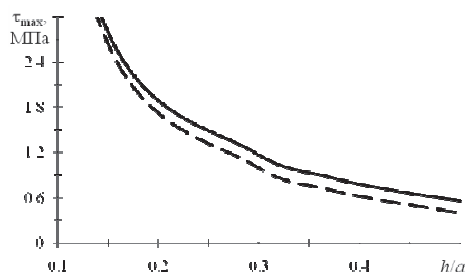


Рис. 1. Зависимость максимального сдвигового контактного напряжения от относительной толщины деформируемого обода. Сплошная кривая — использование точного решения [2]; пунктирная — использование разработанной методики

Заключение. Показана правомерность использования разработанной методики для расчета нормальных и сдвиговых контактных напряжений при качении жесткого цилиндра с деформируемым ободом.

1. Кравчук А. С., Кравчук А.И. прикладные контактные задачи для обобщенной стерневой модели покрытия. — Санкт-Петербург: Научное издание. — 2019.
2. Александров В. М., Мхитарян С. М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. — М.: Наука. — 1983.
3. Скип шахтный: пат. 11460 Респ. Беларусь, МПК В66В 17/32 / В. Я. Прушак, В.Я. Щерба, Д.А. Морев; заявитель Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством — № u 20170053; заявл. 22.02.2017.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)
28—30 июня 2022 г., Гомель, Беларусь

HYBRID ABSORBENT DESIGN BY GAMMA RADIATION-INDUCED
GRAFTING OF ACRYLAMIDE ONTO CHITOSAN

E.K. Fomina, D.L. Kudryavsky, I.A. Klimovtsova, Y.V. Hryniuk, and A.A. Fedorenko

Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University, Belarus, kudryavsky@bsu.by

Polymer hydrogels (HG) are materials based on hydrophilic cross-linked macromolecular compounds that can absorb and retain significant amounts of water [1]. HG are used as water retention agents in agriculture [2], as sorbents for heavy metal ions extraction, in the production of biosensors and sanitary products, cell engineering, crop farming and medicine for the delivery and controlled release of active substances. HG used as absorbents can be based on synthetic or natural polymers. Hybrid absorbent materials combining the properties of HG based on natural (biocompatibility, biodegradability, nontoxicity) and synthetic (mechanical strength, high water absorption capacity) polymers have been increasingly used recently. Chitosan (CTS), which is biodegradable and has antibacterial activity, is often used to produce superabsorbents, particularly for medicine and agriculture [3]. The aim of this work is to obtain hybrid absorbents by radiation induced radical grafting of acrylamide (AAM) on CTS and crosslinking of polymer chains, as well as to determine the sorption properties of obtained HG.

CTS (molecular weight — 250 kDa) solutions in 2% acetic acid with AAm additives were irradiated in air at room temperature using ^{60}Co gamma source. Obtained hydrogels have been purified from unreacted monomer and acetic acid in Soxhlet extractor (8 cycles) and then dried. The rheological properties of equilibrium swollen hydrogels in distilled water were determined on a rheometer RHEOTEST RN 5.1 (Germany) in the oscillation mode. Swelling degree (SD) has been determined gravimetrically (tabl. 1).

Table 1. Swelling degree of hybrid hydrogels based on acrylamide-grafted CTS

Components	Absorbed dose, kGy	SD, g/g	SD after hydrolysis, g/g
1,0% CTS; 5% AAm	30	33,8±1,4	34,7±0,5
1,0% CTS; 10% AAm	30	21,5±0,6	—
1,0% CTS; 20% AAm	30	14,2±0,4	—
1,0% CTS; 30% AAm	30	10,4±0,2	78,5±1,7
0,5% CTS; 20% AAm	30	14,2±0,4	153,8±6,2
2,0% CTS; 20% AAm	30	19,1±0,3	—
1,5% CTS; 20% AAm	30	15,3±0,4	—
1,0% CTS*; 20% AAm	30	13,4±0,4	176,3±8,8
1,0% CTS; 20% AAm	36	12,1±0,2	96,1±4,8

* — Molecular weight of CTS — 50 kDa

CTS solutions with AAm additives have lost fluidity and solubility when exposed to gamma irradiation. This indicates the formation of a polymer network. The graft copolymerization of AAm to CTS was confirmed by differential scanning calorimetry and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy (fig. 1). The results indicate that the grafting of AAm onto CTS macromolecules occurs on both NH_2 and OH groups of the polymer.

Rheological measurements indicate an

enhancement of gel rigidity with increase of AAm concentration (fig. 2). On the contrary, increasing the CTS content in the system leads to the formation of a HG with higher SD. Other conditions being equal, a decrease of the molecular weight of CTS leads to the formation of a product with higher cross-linking density (tabl. 1). The higher the irradiation dose, the higher the value of the obtained HG complex viscosity.

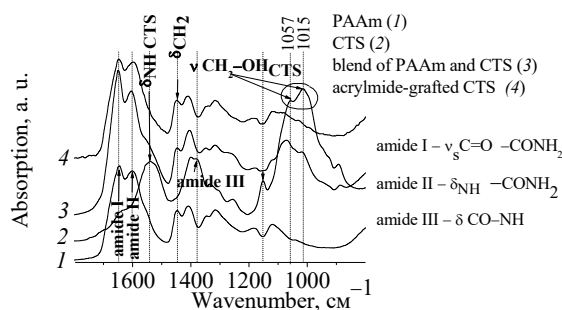


Fig. 1. FTIR spectra fragments of the powders of PAAm, CTS, their blend and hydrogels based on acrylamide-grafted CTS

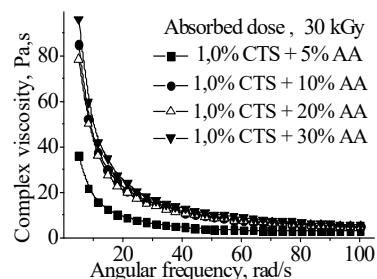


Fig. 2. Dependence of complex viscosity on angular frequency for hybrid hydrogels based on acrylamide-grafted CTS

Alkaline hydrolysis of obtained HG has led to a significant increase of the SD due to the appearance of charged COO^- groups in grafted PAAm chains (tabl. 1). In addition, as the content of COO^- groups in polymer chains increases, the sorption capacity of obtained HG towards Cu(II) ions increases, which indicates the possibility of using such HG as sorbents for heavy metals ions.

Acknowledgements. The research was supported financially by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Contract X22Y3B-025).

1. Ahmed E. M. Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review // *J. Adv. Res.* — 2015 (6), № 2, 105—121.
2. Sikder A., Pearce A. K., Parkinson S. J., Napier R., O'Reilly R. K. Recent trends in advanced polymer materials in agriculture related applications (Review) // *ACS Appl. Polym. Mater.* — 2021 (3), 1203—1217.
3. Cheng B., Pei B., Wang Z., Hu Q. Advances in chitosan-based superabsorbent hydrogels // *RSC Adv.* — 2017 (7), 42036—42046.

THE EFFECT OF THE INTRAVITREAL ADMINISTRATION OF ANTIFUNGAL DRUGS ON FRICTION PROPERTIES OF RABBIT ERYTHROCYTE SURFACE

N.M. Shkliarava¹, I.A. Chelnokova¹, S. Karachrysafi³, Th. Papamitsou³,
A. Sioga³, A. Komnenou⁴, V. Karampatakis⁵, and M.N. Starodubtseva^{1,2}

¹Institute of Radiobiology of the NAS of Belarus, Gomel, Belarus

²Gomel State Medical University, Gomel, Belarus; marysta@mail.ru

³Laboratory of Histology and Embryology, Medical Department, Faculty of Health Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

⁴School of Veterinary Medicine, Faculty of Health Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

⁵Laboratory of Experimental Ophthalmology, Medical Department, Faculty of Health Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Atomic force microscopy (AFM) is used to study various properties of the cell surface at nano- and microscale levels, including the parameters of surface topography, distribution of friction forces, adhesion, and elasticity. The problem of the development of side effects from local antifungal treatment depends on the effect of the drug on the properties of blood cells, including mechanical ones.

The aim of the study was to identify changes in the frictional properties of the surface of peripheral blood erythrocytes of rabbits after intravitreal (IV) administration of two antifungal drugs, micafungin and voriconazole.

Materials and methods. Twelve (12) New Zealand White Rabbits (2–4 kg body weight), aged five (5) months old, were assigned to one of four groups. Male and female rabbits were used. All animals were divided to four (4) groups. The Groups MM and VM were the experimental groups, while the Group C was the control group. In Group MM, two intravitreal injections of micafungin (the first one on day 0 and the second one on day 4) and two intravitreal injections of BSS (the first one on day 0 and the second one on day 4). In Group VM, one intravitreal injection of voriconazole (on day 0) and one intravitreal injection of micafungin (on day 4) and two intravitreal injections of BSS (the first one on day 0 and the second one on day 4). In Group C, one intravitreal injection of BSS on day 0. Blood sampling was performed after 10 days from the last IV injection. Erythrocytes were fixed with 1% glutaraldehyde (37 °C, 15 min) and dried. Scanning was performed using a Bruker BioScope Resolve AFM in a contact mode in air (DNP-10 probe).

Results and their discussion. Depending on the type of drug and the number of injections, the shape of the erythrocyte changed. We have found that for the VM group structural defects as holes in the cell membrane appeared. Fig. 1 represents a microscale area of VM group erythrocyte surface with a defect in the form of a single hole.

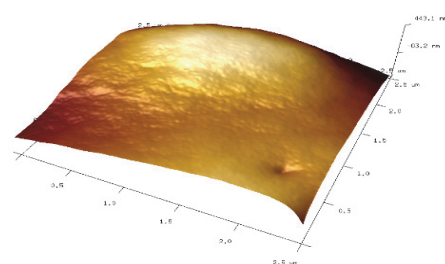


Fig. 1. 3D topographic image of the VM erythrocyte surface. The scan size is 2.5 μm×2.5 μm, resolution is 256×256 pixels

Micro-scale areas of the cell surface became smoother after treatment with the drug. The roughness of topographic maps was reduced in the MM and VM groups (table 1). At the same time, the spatial distribution of friction forces for the same sections of the cell surface has become more heterogeneous. The maps of friction forces showed the presence of nanoscale regions with different values of forces, and the roughness of the map was increased in the MM and VM groups (table 1).

Table 1. The roughness (R_a) of three types of property maps recorded for erythrocyte surface (Me(LQ;UQ))

Group	Height	Deflection Error	Friction
C (n=20)	79.5 (74.3;95.5) nm	12.9 (10.5;15.5) mV	7.0 (6.0;10.9) mV
MM (n=38)	*29.0 (20.5;39.5) nm	**7.0 (5.0;9.6) mV	***11.0 (8.3;15.5) mV
VM (n=42)	*26.5 (22.0;40.25) nm	**7.0 (4.3;8.9) mV	****10.0 (8.0;13.2) mV

Mann Whitney U test: * $p < 10^{-6}$, ** $p < 0.001$, *** $p = 0.0033$, **** $p = 0.0267$. The map size was 1 μm×1 μm. The scanning step was 9.8 nm.

Conclusion. Intravitreal administration of antifungal drugs leads to a significant increase in the spatial heterogeneity of the frictional properties of the surface of peripheral blood erythrocytes, which may affect microcirculation.

ПРОЧНОСТНЫЕ И ФИЛЬТРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

Е.В. Авдеева¹, А.С. Неверов²

¹Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь avdeeva.katerina86@mail.ru

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь

Ранее проведенные авторами исследования показали, что метод бесфильтрной вытяжки позволяет формировать непрерывные тонкие волокна с одинаковым диаметром по всей длине и гладкой поверхностью [1, 2]. Однако информации о сорбционных свойствах полимерных волокон, полученных этим методом, практически отсутствует в открытой печати.

Цель работы заключалась в установлении особенностей фильтрационных свойств волокон на основе полиэтилена, пластифицированного олифой, стеарином и этиленгликолем, полученных методом бесфильтрной вытяжки.

Материалы и методы

Полимерные волокна изготавливали из полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 16803-070 (ГОСТ 16337-77), олифы (ГОСТ 7931-76), этандиола-1,2 (ГОСТ 19710-83), стеарина (ГОСТ 6484-96) методом бесфильтрной вытяжки из расплава при температуре ($T = 423$ К). Использован нетканый полипропиленовый материал SpunBel с поверхностной плотностью 40 г/см^2 («СветлогорскХимволокно», Беларусь).

Морфологию волокон изучали с помощью электронного микроскопа JEM-6000 (Jeol, Япония). Для оценки физико-механических характеристик полимерных композитов проводили исследование их предела прочности при испытаниях на разрыв.

Эффективность воздушной фильтрации (ЭВФ) определялась с помощью специально разработанного лабораторного стенда. С помощью ультразвукового генератора был создан аэрозоль, который пропускали через слою фильтрующего материала SpunBel (диски, диаметром 40 мм) между которыми располагались пластифицированные волокна. ЭВФ рассчитывали как отношение абсолютного изменения концентрации частиц (10 мкм, 2,5 мкм, 1,0 мкм) при фильтрации к концентрации частиц до фильтрации.

Результаты и их обсуждение

Введение пластификатора (олифы, стеарина, этиленгликоля) позволяет сохранить исходную структуру полимера, а также проводить дополнительную ориентацию молекул, что оказывает положительное влияние на физико-механические свойства готового волокна. Возникающие поперечные

силы, стремясь уменьшить его диаметр и обуславливают выдавливание пластификатора, вследствие этого межмолекулярное взаимодействие снова возрастает, препятствуя обрыву волокна (рис. 1). При 25%-ном содержании пластификатора (стеарина) и 15%-ном олифы наблюдается наибольшее относительное удлинение и предел прочности при испытании на разрыв. Использование в качестве пластификатора олифы (65%) приводит к образованию двух взаимопроникающих каркасов, что способствует упрочнению волокон.

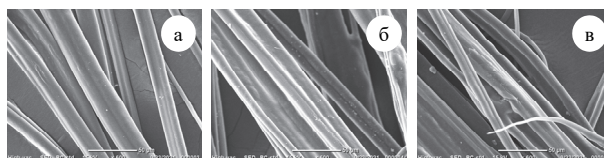


Рис. 1 – СЭМ-изображения волокон ПЭВД пластифицированных (а) олифой (25%), (б) стеарином (25%), (в) этиленгликолем (25%).

Нетканый полипропиленовый материал SpunBel является коммерческим и широко используется для создания фильтров, однако его фильтрующие свойства недостаточны (45,5%) для самостоятельного использования. Применение в качестве прослойки между слоями SpunBel волокон ПЭВД, пластифицированных этиленгликолем, позволило увеличить ЭВФ на 27%, стеарином – 4,7%, олифой – 3,1% для мелкодисперсных частиц.

Бесфильтрная вытяжка волокон из пластифицированных расплавов ПЭВД создает возможность для получения новых видов волокнистых материалов, которые обладают уникальными свойствами. Применение в качестве прослойки между слоями SpunBel пластифицированных волокон ПЭВД позволяет увеличить эффективность фильтрации.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ X21УЗБГ-030.

1. Неверов А.С., Самусева Л.В., Исследование процессов бесфильтрной вытяжки волокон из расплавов пластифицированных полиолефинов / А.С. Неверов, Л.В. Самусева // Материалы, технологии инструменты, 2004, № 9.
2. Шукова Е.В., Неверов А.С., Прочность волокнистых материалов на основе полиэтилена, пластифицированного низкомолекулярными модификаторами Сборник тезисов докладов 54 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Екатеринбург: ФГБУН. ИФМ УрО РАН. 11–15 ноября 2013 г. 300 с, 171

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА СТРУКТУРУ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК

А.С. Астапкин¹, А.С. Рябцев¹, Н.С. Винидиктова², И.В. Царенко¹

¹Гомельский государственный университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vns_ins@mil.ru

Первый синтетический пластик был запатентован в 1862 г., материал назывался «паркезин», который стал дешёвой и яркой заменой слоновой кости и черепашему панцирю. Началась эра синтетических полимеров. Сегодня трудно представить нашу жизнь без синтетических полимерных материалов. Высокие эксплуатационные характеристики, технологичность способствуют их широкому применению во всех отраслях: быту, машиностроении, сельском хозяйстве и т.д. Строение полимеров позволяет получать из них длинномерные материалы (нити, ленты, волокна) обладающие высокими прочностными характеристиками.

Цель работы исследовать влияние технологической среды на структуру полипропиленовых лент.

Материалы и методы. Для эксперимента использовали ленточные заготовки из линейного полимера, полипропилена (ПП). По влиянию пластификатора на температуру плавления (с помощью ДТА, дериватограф Q-1500 (Венгрия) отобрали пластификаторы различных классов: углеводороды (парафин), ароматические амиды (бензамид), масла (веретенное, вазелиновое). Образцы ПП лент подвергали ориентационной вытяжке на оригинальном лабораторном устройстве (рис. 1), конструкция которого позволяет проводить ориентационную вытяжку заготовок в технологических средах. Структуру изучали с помощью растрового электронного микроскопа VEGA/TESCAN. Деформационно-прочностные показатели определяли на машине Instron (ГОСТ 14236).

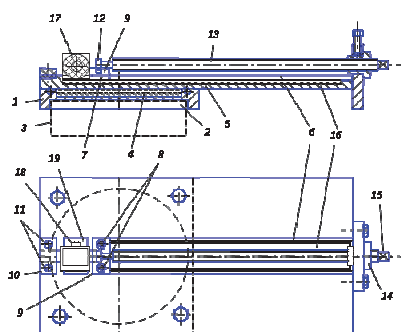


Рис. 1. Схема устройства для ориентационной вытяжки образцов: 1 – корпус; 2 – нижняя выточка; 3 – электроплитка; 4 – парафиновая баня; 5 – плита; 6 – паз; 7 – ползун; 8 и 11 – винты; 9 и 10 – прижимные планки; 12 – наконечник; 13 – винт; 14 – гайка; 15 – хвостовик; 16 – ванна для жидкости; 17 – фторопластовый ролик; 18 – ось; 19 – кронштейн.

Результаты и их обсуждение. Существует несколько способов введения пластификаторов в полимер, из которых нами были выбраны два: переработка

полимера с пластификатором; 2) сорбция полимерным материалом пластификатора из технологической среды, т.е. в процессе ориентационной вытяжки заготовки. Установлено оптимальное количество пластификатора для введения при переработке. Анализ данных, полученных в ходе эксперимента, позволяет сделать вывод, что переработка полимера с пластификатором не приводит к увеличению ее прочности, однако некоторые из них оказывают значительное влияние на их удлинение при ориентационной вытяжке: вазелиновое масло (1 мас.%) до 46 %, веретенное масло (3 мас.%) до 38 %, глицерин (1 мас.%) до 29 %.

Результаты эксперимента коррелируют при введении пластификатора вторым способом, сорбцией их технологической среды. Однако для образцов, подвергнутых ориентационной вытяжке в среде вазелинового масла отмечено увеличение прочности на 10 % по сравнению с образцами из ПП, подвергнутых ориентационной вытяжке на воздухе.

С помощью растрового электронного микроскопа была исследована поверхность образцов из ПП, которые подвергали ориентационной вытяжке на воздухе и в среде вазелинового масла (рис. 2).

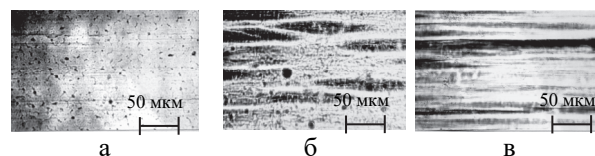


Рис. 2 – Микрофотографии образцов ПП: исходного (а), подвергнутого ориентационной вытяжке на воздухе (б) и в среде вазелинового масла (в)

Анализ проведенных исследований позволил сделать вывод, что ориентационная вытяжка в технологической среде способствует увеличению прочностных характеристик, во-первых, из-за более равномерного прогрева ленты при ориентационной вытяжке в технологической среде в сравнении с вытяжкой на воздухе (т.к. жидкость является лучшим теплоносителем). Во-вторых, все выбранные технологические жидкости пластифицируют ПП и оказывают физико-химическое воздействие на поверхностный слой лент, стимулируя его пластическое течение под растягивающей нагрузкой с минимальным количеством разрывов макромолекул. Еще одним положительным фактором при вытяжке в среде пластификатора является возможность исключить взаимодействие полимерного образца с кислородом воздуха, что снижает вероятность термоокислительной деструкции материала.

ФРИКЦИОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ПОВЕРХНОСТНО-МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ МДО-ПОКРЫТИЯМИ В ТЯГОВЫХ ПРИВОДАХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В.Л. Басинюк, С.Н. Поддубко, Р.Е. Волкотруб, А.А. Глазунова

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь, e-mail: Vladbas@mail.ru

Цель – развитие научных основ использования поверхностно-модифицированных наноструктурированных МДО-покрытий в электромеханических тяговых приводах электромобилей для повышения их нагрузочных способностей и ресурса при одновременном снижении виброакустической активности и себестоимости привода.

Методы исследований

Осуществлен анализ особенностей использования двух типов электромеханических тяговых приводов электромобилей, отличающихся типом размещенной между электродвигателем и коробкой скоростей высокоскоростной понижающей обороты передач. В качестве одной из передач использована косозубая прецизионная зубчатая передача, в качестве альтернативной — поликлиновая передача со шкивами из алюминиевых сплавов, имеющих МДО-покрытия [1], поверхностно-модифицированные наноструктурированными материалами. Проведены сравнительные лабораторные испытания пар трения с модифицированными МДО - покрытиями и на основе анализа полученных результатов осуществлена оценка эффективности их использования в поликлиновых передачах тяговых приводов электромобилей.

Результаты и их обсуждение

С учетом основной тенденции развития тяговых приводов электромобилей, ориентированной на постоянное увеличение частоты вращения электродвигателя от 9000 об/мин до 18000 об/мин в первой понижающей его обороты передаче может быть использована либо косозубая зубчатая, либо открытая поликлиновая передача. Условные схемы конструктивного исполнения этих вариантов тяговых приводов показаны на рисунке 1.

Необходимо отметить то, что генерируемые зубчатыми передачами вибрации и шум имеют общий источник — динамическое взаимодействие зубьев, уровень которого зависит от степени точности зубчатой передачи и используемой модификации профиля зубьев, окружной скорости и нагруженности, а также торцевого и осевого коэффициентов перекрытия. На шум также влияют условия смазки зубчатых колес. У поликлиновых передач этих факторов нет и ее использование позволяет уменьшить шум и вибрации тягового привода в 2—3 раза, но эта передача имеет существенно меньший, по сравнению со стальной косозубой, ресурс. При

этом в открытых поликлиновых передачах в ряде случаев интенсивно изнашиваются шкивы, поскольку рабочая поверхность ремней шаржируется частицами абразивной пыли, которая стирает ответную поверхность при проскальзывании.

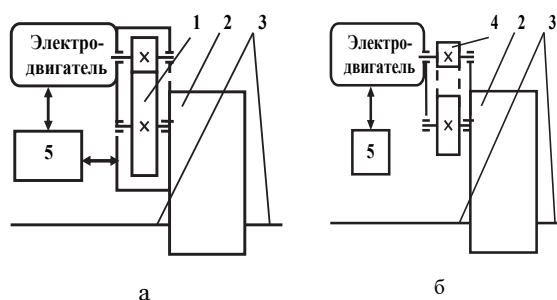


Рис. 1. Условные схемы конструктивного исполнения тяговых приводов электромобилей с первой скоростной понижающей косозубой (а) и поликлиновой (б) передачами: 1 — косозубая передача; 2 — двух или трехступенчатый зубчатый редуктор (коробка скоростей); 3 — выходные валы, связанные с ведущими колесами электромобиля; 4 — поликлиновая передача; 5 — система принудительного охлаждения

Для комплексного решения этой задачи может быть использована конструкция тягового электромеханического привода, обеспечивающая повышенную ремонтопригодность поликлиновой передачи, а также исполнение последней со шкивами, рабочие поверхности которых имеют поверхностно модифицированное оксидокерамическое МДО-покрытие [2].

Анализ результатов лабораторных исследований приведенных выше пар трения с поверхностно-модифицированным МДО-покрытием показал, что их использование позволяет существенно повысить не только износостойкость сопряжения, но и его нагрузочную способность, что, в свою очередь, дает возможность уменьшить силу натяжения и соответственно увеличить усталостный ресурс ремня.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № T21ЭТ-012 и договор № T21ЭТ-020/ОИМ).

1. Поддубко, С. Н. Фрикционные передачи повышенной мощности тяговых приводов электромобилей. Части 1-2 / С. Н. Поддубко, В. Л. Басинюк, А. А. Глазунова // Актуальные вопросы машиноведения. – 2021. – Т. 10. – С. 33-40.
2. Электромеханический тяговый привод электромобиля: пат. ЕА202290097 / Поддубко С.Н., Басинюк В.Л., Волкотруб Р.Е., Глазунова А.А., Лобкова М.П.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗДИРУ РАЗДИРАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ СВАРИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТРУБ МЕТОДОМ СПИРАЛЬНОЙ НАМОТКИ

А.С. Васильева¹, Н.В. Бисерова², В.В. Коврига¹

¹ООО «Группа Полимертепло»,
²ООО «Климовский трубный завод»

В последние годы на предприятиях группы «Полипластик» освоено производство нескольких видов гофрированных труб, получаемых методом спиральной намотки. Схематические разрезы некоторых сечений труб приведены на рис. 1

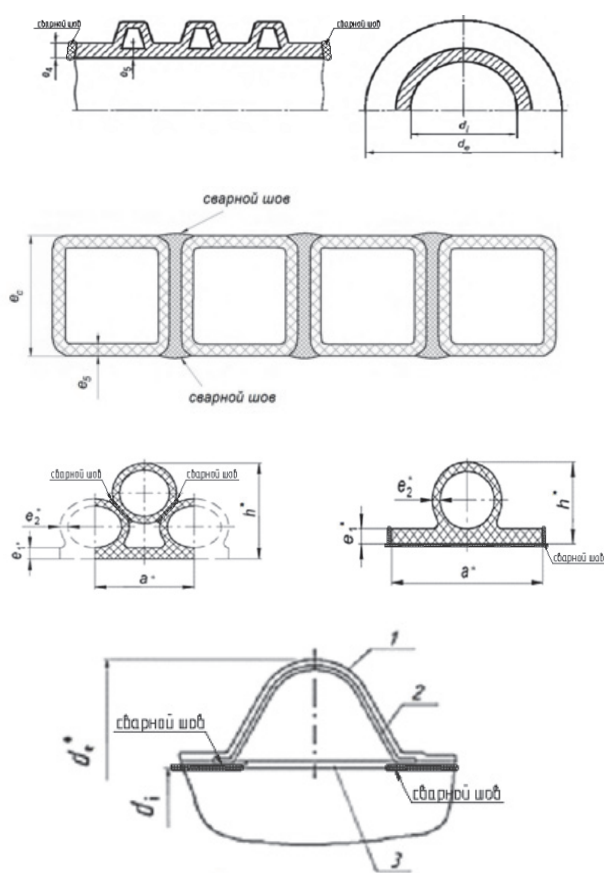


Рис. 1 Разрезы сечений труб

На этом же рисунке штриховкой обозначены свариваемые поверхности. Как видно, поверхности сварки занимают большие доли поверхности труб. Однако до настоящего времени отсутствовали методики определить прочность связи в этих соединениях. Целью настоящей работы являлась разработка методов определения прочности связи на свариваемых поверхностях методом сопротивления раздиру

раздирающим элементом. Для этого была применена методика двух отверстий, которые засверливались в зоне сварного шва (1) и отнесение полученного показателя сопротивления раздиру к показателю сопротивления раздиру определенного для испытываемого материала вне зоны сварки.

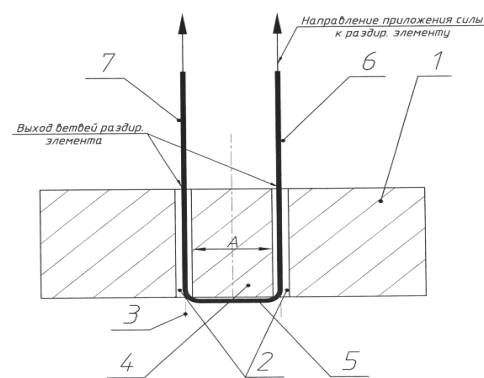


Рис. 2 Схема испытаний на раздир по системе двух отверстий

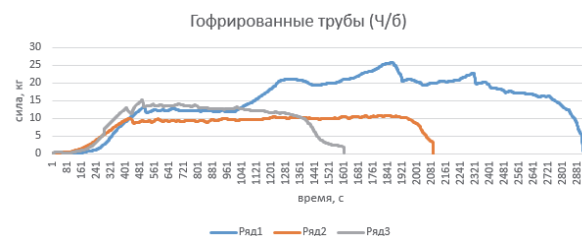


Рис. 3 Кривая раздира

В качестве результата используются выраженные в процентах соотношения показателя сопротивления раздиру раздирающим элементом в зоне сварки к показателю сопротивления раздиру в блоке исходного материала. Предложенная методика позволяет выявить ослабленные места в зоне сварных соединений.

1. Патент №2698105 Способ определения сопротивления раздиру раздирающим элементом изделия из полимера / Коврига В.В., Васильева А.С., Орешенкова Т.Ф., Маликов А.И.

ЭКОЛОГИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Н.С. Винидиктова

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vns_ins@mail.ru

Введение. Сегодня трудно представить жизнь человека без использования полимеров. Все чаще в быту и промышленности бумагу, текстиль, дерево и металл заменяют полимерными материалами, что обусловлено их физическими и эксплуатационными свойствами, технологичностью при переработке и дешевизной. Однако их преимущества со временем стали превращаться в недостатки. Чаще всего полимерные материалы используют для изготовления одноразовой посуды, тары и упаковки, что сопровождается увеличением объемов полимерных отходов, которые, в большинстве своем биоинертны.

Цель: разработать составы экологичных композиционных материалов на основе растительного сырья для изготовления биоутилизируемой тары и упаковки.

Материалы и методы. В работе исследована возможность получения композиционных материалов на основе растительных компонентов возобновляемых отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности Республики Беларусь: жом свекловичный (ОАО «Городейский сахарный комбинат»), гречневая лузга (ОАО «Гомельхлебпродукт»). Растительные компоненты использовали в исходном виде и после химической обработки. Структуру исследовали на микроскопе VEGA II LSH. Компоненты измельчали с помощью лабораторного блендера 8010S до 0,5—0,8 мкм. В качестве связующего использовали компоненты: животного (казеин, сложный белок, образующийся при створаживании молока) и синтетического (полилактид, биоразлагаемый полимер) происхождения. Образцы композиционного материала получали методом горячего ($T = 160—175\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10—15\text{ МПа}$) или холодного прессования ($T = 20—22\text{ }^{\circ}\text{C}$), в зависимости от состава композиции.

Результаты и их обсуждение. Известно [1, 2], что гречневая лузга (ГЛ) — пластинчатая плодовая оболочка довольно жесткая из-за высокого содержания клетчатки и минеральных веществ. В связи с этим в работе была исследована структура ГЛ до и после ее химической обработки раствором щелочи. Микрофотографии структуры ГЛ до и после обработки представлены на рис. 1.

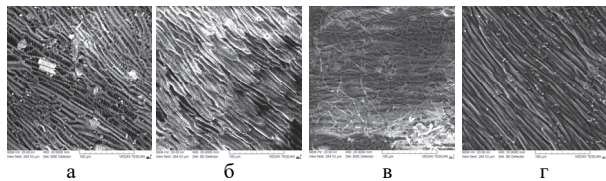


Рис. 1 — Микрофотографии пластин ГЛ до (а, в) и после (б, г) обработки: а, б — наружная сторона; в, г — внутренняя сторона

Отмечено, что после химической обработки ГЛ отсутствуют поперечные связи (рис. 1), что ведет к снижению жесткости пластин ГЛ.

Жом свекловичный (ЖС) — отход переработки сахарной свеклы, который широко используют в качестве корма для животных. ЖС в отличие от ГЛ менее жесткий, но гидрофильный материал, что с одной стороны хорошо при совмещении компонентов композиции, а с другой — сказывается на способности готового материала сорбировать воду.

При использовании в композиции синтетического связующего (полилактида, ПЛ), образцы изготавливали термопрессованием, предварительно смешивая компоненты. Для получения композита необходимо введение ПЛ в количестве не менее 20 %. Экспериментально установлено, что свойства композиционного материала существенно зависят от марки ПЛ. Образцы с ПЛ марки Escovio-23B1 более пластичные, чем с ПЛ марки Ingeo 4043D.

При использовании в композиции связующего животного происхождения (казеина, Кз), образцы формовали холодным прессованием. В эксперименте использовали казеин двух видов: ферментативный [3] по лабораторно-технологическому регламенту (ТР № 114-2021) и технический кислый (ОАО «Молодецкий молочный комбинат»). Изготавливали связующее на основе водного раствора Кз с использованием нашатырного спирта и гашеной извести. Измельченные растительные компоненты смешивали со связующим, формовали с использованием пресса, сушили при температуре плюс 20—22 °С. Образцы получали прочные, но недостаточно пластичные.

Экспериментально установлено, что для биоразрушения образцов с ПЛ требуется более 2 месяцев. Важное значение имеет и ценовой фактор: композиции с Кз в 5—7 раз дешевле, чем с ПЛ в качестве связующего. Образцы с Кз способны к биоразрушению в течение 5—7 дней. Продолжаются экспериментальные исследования повышению пластичности композиционных материалов с Кз. Композиционные материалы на основе растительных компонентов и Кз в дальнейшем возможно утилизировать, используя их в качестве корма для животных.

Работа выполнялась в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы», тема 4.2.2, НИР 2.

1. Клинецвич В.Н., Флюрик Е.А. Способы использования лузги и гречихи пашенной // Труды БГТУ. — 2020, серия 2, № 1, 68—81.
2. Влияние комбинированного гидролиза на пищевую ценность лузги гречихи и использование её пищевых волокон в производстве мучных кондитерских изделий / Каравай Л.В. и др. — <http://www.sworld.com.ua> (дата обр.: 18.04.2021)
3. Патент ВУ 15816 Способ получения казеина / Пинчук Л.С. и др.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННОГО ТГА/ИКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Е.Н. Волнянко¹, Е.В. Воробьева², О.А. Макаренко¹

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь. volniansko@mail.ru

²Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Гомель, Беларусь

Наиболее выдающиеся научные результаты на современном этапе развития находятся в области междисциплинарных исследований и комплексных методологических подходов. Ведущие производители аналитического оборудования в настоящее время предлагают исследователям и аналитическим промышленным лабораториям системы совмещенного анализа, позволяющие детально, с высокой точностью анализировать материалы: термогравиметрический анализ (ТГА)/инфракрасная спектроскопия (ИКС), ТГА/масс-спектрометрия (МС), ТГА/газовая хроматография (ГХ). Известны модификации синхронного анализа из трех методов, например, ТГА/ИКС/МС или ТГА/ ИКС/ГХ и т.п. Совмещение термоанализаторов и спектрометров и/или хроматографов облегчает методологию проведения анализов, сокращает время эксперимента, снижает погрешности результатов, а в некоторых случаях позволяет получить уникальные данные в режиме реального времени [1, 2].

Цель работы. Исследовать образцы полимерных композиционных материалов (ПКМ) совмещенными методами ТГА/ИКС.

Материалы и методы. Исследовали ПКМ на основе полиэтилена низкой плотности (Нафтан, Беларусь), модифицированный антиоксидантом Irganox 1010 (BASF, Германия) и ультрадисперсными металлосодержащими частицами Fe₃O₄ (размер 20—30 нм, «US Research Nanomaterials», США), ZnO (размер частиц 30±10 нм, Aladdin Chemistry). Частицы и антиоксидант вводили в полимерный порошок, предварительно диспергируя его в полярном растворителе под воздействием ультразвука. Режим сонообработки 20 кГц, 5 мин на приборе УЗДН-1 (Россия).

Дифференциально-термический (ДТ) и термогравиметрический (ТГ) анализы материалов проводили на синхронном термоанализаторе «STA 449 F3 Jupiter» («NETZSCH-Gerätebau GmbH», Германия), совмещенном с ИК-Фурье спектрометром («Bruker Optik», Германия). Образцы формовали методом прессования. Анализ проводили в среде азота при скорости нагрева 4 К/мин, масса навески 10 мг.

Результаты и их обсуждение. Исследовали физико-химические характеристики изучаемых ПКМ: температуры стеклования, плавления, деградации. Параллельно изучили особенности, происходящие в процессе пиролиза ПКМ: данные о ко-

личестве и химическом строении выделяющихся газов.

Программное обеспечение (ПО) совмещенного ТГА/ИКС традиционно позволяет визуализировать и обрабатывать кривые ДТ, ТГ. Важным преимуществом является возможность получить кривую выделяющихся газов по методу Грамм-Шмидта, которая значительно облегчает определение временной и температурной областей наблюдения наиболее интенсивных химических процессов. Пики на этой кривой свидетельствуют о наибольшем выделении газообразных веществ при пиролизе ПКМ, их можно наблюдать в режиме реального времени.

В режиме синхронного анализа также фиксировали ИК-спектр выделяющихся газов. ПО за счет интегрированного использования двух программных продуктов Proteus и Opus позволяет получить трехмерные изображения ИК-спектра во временном интервале эксперимента и в зависимости от волнового числа. Кривая Грамм-Шмидта коррелирует с ИК-спектром: пики на кривой Грамм-Шмидта соответствуют наиболее интенсивным пикам на ИК-спектре, таким образом, облегчая понимание основных химических превращений ПКМ в процессе пиролиза (рис. 1).

По результатам эксперимента установлены стадии пиролиза исследуемых ПКМ, состав выделяющихся газов, возможные межфазные взаимодействия.

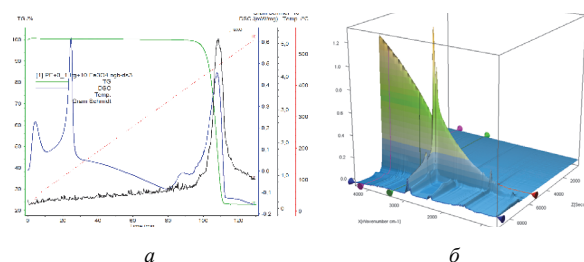


Рис. Результаты синхронного ТГА/ИКС: кривые ТГА (а) и трехмерный ИК-спектр (б)

1. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://analyzing-testing.netzsch.com>. Дата доступа: 10.05.2022.
2. Горюнов В.А., Чуйков А.М., Билалов К.М. Возможности применения инфракрасного фурье спектрометра tensor-27 для физико-химического анализа газообразных продуктов горения// Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016.-2. -№1. – С. 362-364.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БАНДАЖА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ГРУЗОВОГО ЛОКОМОТИВА МЕТОДОМ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

Е.Н. Волнянко¹, В.Д. Докукин², А.В. Тимошенко³

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь. volniano@mail.ru

²Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Гомель, Беларусь

³РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Локомотивное депо г. Гомель, Гомель, Беларусь

Наиболее современными устройствами для создания 3D-моделей на основе реальных физических объектов в настоящее время являются 3D-сканеры. Их активно используют для реверс-инжиниринга (*reverse engineering* или обратное проектирование) при проектировании, в частности, для решения задач импортозамещения в машиностроении. Однако, 3D-сканеры применяют в достаточно широком спектре приложений: от промышленного дизайна до 3D-изображений человека и оцифровки культурных артефактов.

Цель работы. Исследование методом 3D-сканирования поверхностей трения, оценка особенностей изнашивания бандажей колес локомотива.

Материалы и методы исследования. В представленной работе наблюдали сегменты изношенных частей бандажа колесной пары грузового локомотива (рис. 1).



Рис. 1. Образцы бандажей

Использовали оптический 3D-сканер Einscan Pro HD (Shining 3D, КНР). Сканер предназначен для получения монохромного изображения, распознает матовые поверхности, обеспечивает высокую точность оцифровки, до 0,045 мм. На объекты с глянцевой поверхностью или с прозрачным корпусом на поверхность наносили матирующий спрей. Максимальная скорость оцифровки 3 млн точек/с. Для автоматизации при сканировании использовали комплект, состоящий из штатива и поворотного стола (360°). Режим сканирования: точность 0,1 мм, область сканирования 0,03—4 м, режим выравнивания (*reference point align*). Калибровали сканер с использованием программного обеспечения (ПО) «Exscan Pro»; сканировали образцы, вычисляли карту глубин, на основе которой получали облако точек, далее переводили его в полигональную модель и в CAD-систему при помощи ПО «Solid Edge SHINING

3D» (Siemens, Германия); получали 3D-модель в ПО «Autodesk Inventor» (Autodesk, США).

Результаты и их обсуждение.

В результате проведенной работы получили трехмерные модели поверхностей бандажей (рис.3). Однако возникли сложности с оценкой степени износа гребня поверхности катания.



Рис. 2. Трёхмерная модель образцов бандажей

Для контроля геометрии использовали программу Geomagic Control X (Artec 3D, Люксембург), в которой провели сравнительную оценку эталонной твёрдотелой трёхмерной поверхности бандажа и трёхмерной отсканированной поверхности. Выравнивая исследуемые объекты, оценили топографию поверхностей полученных ранее при сканировании. Результаты представили в виде отчёта по 3D- и 2D-анализу (рис. 3, а и б). Синим цветом показаны места, где произошло изнашивание детали. Таким образом, наиболее интенсивному изнашиванию подвержен гребень бандажа. Износ на поверхности катания неоднороден, выявлены области с различной степенью износа. Таким образом установлено, что метод 3D-сканирования можно эффективно применять для неразрушающего контроля профиля бандажей колес локомотива, количественно оценивая значения топографии поверхностей трения.

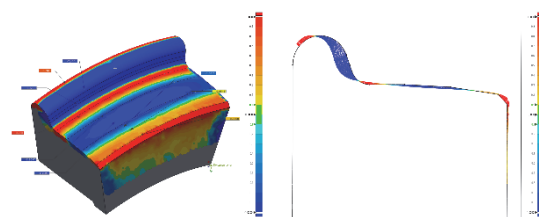


Рис. 3. Результаты сравнительной оценки поверхностей трения образцов бандажей: 3D- (а) и 2D-модели (б)

АНТИСЕПТИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО ТЕРПЕНОИДНОГО СЫРЬЯ

Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич

Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, elenagapankova@gmail.com

В практической деятельности человека широко используются природные материалы: древесина, бумага, хлопок, лен, пенька и др. В то же время они служат источником углеродного питания для многих живых организмов, в первую очередь для аэробных и анаэробных бактерий, а также мицелиальных грибов.

Воздействие микроорганизмов на природные материалы избирательно и зависит от тех условий, в которых они находятся.

Влияние аэробных и анаэробных бактерий проявляется при низких содержаниях воздуха и температуре, а также при отсутствии солнечного света. Плесневые грибы имеют сравнительно невысокую дереворазрушающую способность, но быстро разрушают волокнистые материалы. Они могут воздействовать за пределами возможностей высших грибов, более устойчивы к неблагоприятным факторам и многим антисептикам. Наибольший ущерб древесине причиняют дереворазрушающие грибы родов *Serpula* и *Coniophora*, вызывающие бурую гниль древесины и относящиеся к так называемым домовым грибам.

Среди мер борьбы с биоповреждениями материалов одно из первых мест занимают химические средства защиты. Антисептические составы должны отвечать ряду требований: быть токсичными по отношению к грибам и насекомым, но безвредными для человека и животных; хорошо проникать в материал, не снижать его прочность и не портить внешний вид; быть стойкими во времени, не вымываться водой и т. д.

Несмотря на достаточно большой выбор АС, проблема защиты материалов, изделий и сооружений от биологического повреждения по-прежнему является актуальной, так как только учтенные потери от биоповреждений составляют 5—7% стоимости мировой промышленной продукции и имеют тенденцию к росту.

В настоящее время на рынке Беларуси преобладают традиционные хлорсодержащие антисептические средства, препараты, содержащие α -пирен, а также фенольные препараты, которым присущ ряд существенных недостатков: высокая токсичность, относительно невысокая активность в отношении большинства патогенных микроорганизмов и грибов. Кроме того, их рабочие растворы малостабильны, коррозионно-активны, имеют выраженный запах, раздражают кожу и слизистые оболочки, повреждают защищаемые материалы.

Вследствие этого разработка новых высокоэффективных и безопасных для человека составов, получаемых на основе химически функционализированного терпеноидного сырья является актуальной задачей.

Целью работы является разработка антисептических составов на основе функционализированного терпеноидного сырья.

В качестве исходного сырья использовали последовательно химически функционализированные фурандионом-2,5 и алифатическими алканаминами скипидарные растворы смоляных кислот различного химического состава.

Для установления компонентного состава полученных продуктов использованы такие современные методы, как ЯМР- и ИК-спектроскопия.

Для исследования антисептических свойств подавлять рост грибов на природных материалах (древесине) были приготовлены пропиточные составы, содержащие пленкообразующий компонент, антисептик и растворитель.

На рисунке 1 приведены образцы древесины, обработанные разработанными составами и контроль без обработки.

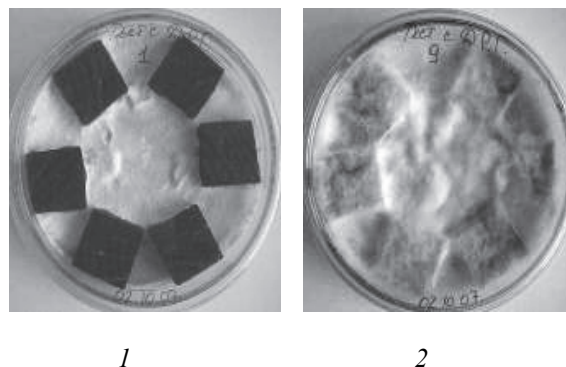


Рис. 1. Образцы древесины, обработанные разработанными составами и контроль без обработки: 1 — древесина, обработанная разработанным составом; 2 — древесина без обработки (контроль)

Из данных исследований следует, что одним из наиболее эффективных антисептических составов, подавляющих полностью рост плесневых, дереворазрушающих и дереворазрушающих грибов, является последовательно химически функционализированные фурандионом-2,5 и алифатическими алканаминами скипидарные растворы смоляных кислот.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ФРАКЦИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Е.С. Глинников¹, Н.С. Винидиктова², Д.Л. Стасенко¹

¹Гомельский государственный университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vns_ins@mail.ru

Введение. Переработка нефти и нефтепродуктов с целью получения, как правило, продуктов меньшей молекулярной массы — моторного топлива, смазочных масел и т.п., а также сырья для химической и нефтехимической промышленности — крекинг, чаще всего осуществляется двумя способами термическим и каталитическим. Этот процесс проходит при температурах около 500 °С и сопровождается большими энергетическими затратами.

Цель — изучить возможность снижения температуры процесса интенсивного выделения летучих фракций углеводородов из жидких нефтепродуктов.

Материалы и методы.

Объектами исследования служили нефть (скважина Речицкого месторождения), нефтепродукты (п-ксилол, керосин, машинное масло).

В качестве модели рассматривали процесс конвертирования углеводородов под воздействие электрического разряда, схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

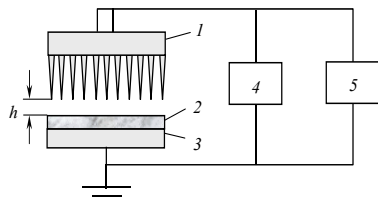


Рис. 1 — Схема установки для создания коронного разряда: 1 — игольчатый электрод; 2 — полимерный образец; 3 — заземленный электрод; 4 — вольтметр; 5 — источник высокого напряжения

Над пробой нефтепродукта, помещенной на чашку аналитических весов, устанавливали металлический игольчатый электрод, соединенный с источником высокого напряжения, включали источник высокого напряжения, и между электродом и поверхностью пробы возникал газовый разряд. Регистрировали кинетические зависимости потери массы пробами.

В работе провели оптимизацию параметров. Одинаковые пробы нефти, нефтепродуктов и их смесей обрабатывали коронными разрядами разной напряженности E при $T = 25$ °С. Регистрировали потерю массы пробы Δm после электрической обработки в течение 120 мин.

Модульный эксперимент по имитации крекинга проводили двумя способами: 1) классическим способом, с нагревом пробы, без использования коронного разряда; 2) контрольный, интенсификация процесса под воздействием коронного разряда без дополнительного нагрева.

Результаты и их обсуждение. Анализ потери массы проб тройной смеси нефтепродуктов и нефти в результате обработки коронным разрядом разной напряженности E показывает, что: 1) оптимальное значение напряженности поля коронного разряда соответствует $E = 3000$ кВ/м, т.к. увеличение напряженности не приводит к росту выхода летучих фракций нефтепродуктов; 2) нижней границей оптимального диапазона напряженностей является $E_{min} = 500$ кВ/м, т.к. на участке линейного роста Δm , который соответствует $E = 100—3000$ кВ/м, при $E = 100$ кВ/м начинается неустойчивость коронного разряда; 3) в оптимальном диапазоне напряженностей $5 \cdot 10^2 \leq E < 3 \cdot 10^3$ кВ/м имеет место достаточно высокий выход летучих, сравнимый с нагреванием проб от внешнего источника теплоты (таблица)

На рис. 2 показаны зависимости, иллюстрирующие феномен ускоренного отделения летучих фракций тройной смеси нефтепродуктов под действием поля коронного разряда.

Таблица. Изменение массы пробы при воздействии коронным разрядом разной напряженности

E , кВ/м	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	$3 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$
Δm , %	34	37	40	43	43

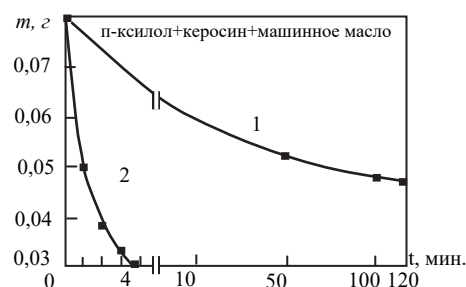


Рис. 2 — Зависимости отделения летучих фракций под воздействием коронного разряда (2) и без (1)

Анализ данных свидетельствует о следующем: скорости потери массы пробами нефтепродуктов под действием электрического поля на порядок и более превышают скорости испарения в контрольных экспериментах; скорость потери массы зависит от летучести нефтепродуктов — наиболее высока у п-ксилола и самая низкая — у машинного масла; потеря массы проб, состоящих из смеси нефтепродуктов, происходит более длительно, чем из исходных нефтепродуктов, по-видимому, из-за физико-химического взаимодействия компонентов.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛОВ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СМАЗКИ

Ф.А. Григорьев¹, И.Н. Ковалёва¹, Л.Н. Марченко², В.В. Подгорная¹

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь,
grigoriev.feodor@gmail.com

Для оценки электрического сопротивления в электрическом контакте использовали методику ПМИ 080-2022 [1]. Исследовали электроконтактный смазочный материал СК-1 и базовую смазку ЦИАТИМ-201. Значение электрического сопротивления фиксировалось в изготовленной для этих целей ячейке, указанной на рисунке 1. Испытания проводились при стандартных значениях температуры и влажности.

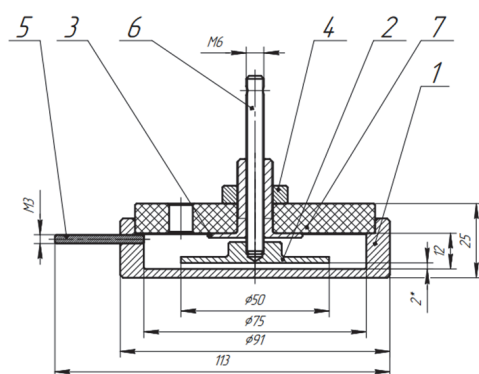


Рисунок 1 — Схема плоской измерительной ячейки двухзамкнутого типа для определения удельного электрического сопротивления: 1 — высоковольтный электрод (внешний); 2 — измерительный электрод (внутренний); 3 — втулка; 4 — гайка; 5 — контакт внешнего электрода, 6 — контакт внутреннего электрода

В измерительной ячейке внутренний контакт имеет возможность вращаться по резьбе втулки 3 так, чтобы установить необходимый зазор между электродами. Во внешний высоковольтный электрод, являющийся одновременно корпусом измерительной ячейки, загружалась порция смазочного материала в объеме, необходимом для полного заполнения зазора между электродами. К контактам электродов подключался тераомметр и производились измерения электрического сопротивления.

При различных расстояниях между электродами d (мм) и различном напряжении U (В) проводились пять независимых испытаний по измерению показателя электрического сопротивления R (Ом). В результате имеем двухфакторный эксперимент.

Результаты эксперимента представлены в виде графика зависимости электрического сопротивления R от факторов расстояния между электродами d и напряжениях U (рисунок 2).

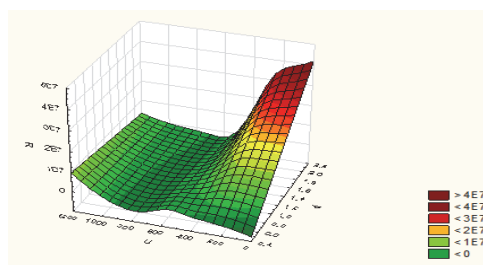


Рисунок 2 — Зависимость электрического сопротивления R от факторов расстояния между электродами d и напряжениях U

Для использования результатов эксперимента, то есть расчета электрического сопротивления R в зависимости от расстояния между электродами d в диапазоне 0,5 – 2 с шагом 0,5 при различных напряжениях U от 100 до 1000, оценим регрессионную зависимость отклика R от факторов d и U . Очевидно, что линейная зависимость не отражает внутреннюю структуру процесса. Поэтому для аппроксимации была выбрана квадратичная регрессия. Оцененная модель в ППП Statistica 12.0 имеет вид

$$R = -14195940 + 27063393 d - 32570 d \cdot U + 20 U^2$$

Поскольку вероятность ошибки p для всех факторов составляет $p < 0,05$, то статистическая значимость регрессии имеет 95%-ный доверительный уровень.

Регрессия электрического сопротивления по факторам позволяет рассчитывать его значение в широком диапазоне 5—30 000 000 кОм, напряжения 100... В, расстояния между электродами 0,5—5 мм и любых их комбинациях.

Таким образом можно сделать вывод, что при изменении условий контакта, а именно изменений зазоров или величины электрического напряжения, можно определить величину электрического сопротивления для конкретного электроконтактного смазочного материала СК-1.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований (ГПНИ задание 4.2.2).

1. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2008. 680 p.
2. Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. Электрические контакты: Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008 – 560 с.

ПОДБОР СХЕМЫ ТРЕНИЯ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕНИЯ В КОЛЕННЫХ СУСТАВАХ

Ф.А. Григорьев*, Д.В. Чарнаштан, П.Ю. Игнатенко, В.И. Николаев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, *grigoriev.feodor@gmail.com

Введение. Создание эффективных коленных имплантов человека невозможно без изучения процессов трения биологических тканей и искусственных материалов в среде синовиальной жидкости. Эта задача требует первоочередного определения схемы испытаний и нагрузок, возникающих при работе коленного сустава.

Цель исследований. Обоснование схемы трения, нагрузки, скорости и материалов для моделирования процессов трения в коленном суставе человека.

В настоящее время моделирование процессов трения в суставах представляет собой важную задачу, так как определив условия трения и нагрузок, в последующем можно моделировать процессы, и на основе имеющихся данных создавать эффективные имплантаты.

Коленный сустав выполняет два основных самостоятельных движения: сгибательно-разгибательное движение в большеберцово-бедренного сустава в достаточно большом диапазоне (до 130°) в сагитальной плоскости и ограниченные вращательные движения (до 10°) большеберцовой кости в горизонтальной плоскости. При обычной ходьбе, голень человека отклоняется в диапазоне $30\text{--}45^\circ$ [1]

Естественное строение коленных суставов обусловлено их специфическими двигательными функциями и одновременно необходимостью сохранения высоких механических характеристик и долговечности. С точки зрения механики суставы животных и человека представляют собой эффективные кинематические пары IV класса (цилиндрический шарнир), способные выдерживать значительные нагрузки в течении длительного времени.

Результаты анализа литературных данных свидетельствуют, что средняя номинальная площадь контакта внутреннего мыщелка разогнутого колена составляет $2,5\text{--}6,7\text{ см}^2$, наружного мыщелка — $1,7\text{--}5,1\text{ см}^2$. [2]. Таким образом, в зависимости от положения сустава его общая номинальная площадь контакта составляет $4,2\text{--}11,8\text{ см}^2$. По данным работы [3] нагрузки, приходящиеся на коленный сустав человека, составляют $0,5\text{--}2,1\text{ МПа}$ в спокойном состоянии и по расчетам в 1,5 раза больше при ходьбе со скоростью 5 км/ч — от $0,75$ до $3,2\text{ МПа}$

В различных источниках приводятся противоречивые данные по скорости относительного перемещения мыщелков в коленном суставе. Так в работе [4] при испытаниях материалов используется скорость скольжения $0,5\text{ м/с}$, соответствующая, по мнению автора спокойной ходьбе. С учетом возможности более быстрого движения человека мож-

но принять ее равной $0,5\text{--}1,0\text{ м/с}$.

Для моделирования механизмов трения и смазки в суставах, необходимо не только воспроизвести кинематику движения и действующие нагрузки, но и определиться с испытываемыми материалами. В настоящее время наиболее распространенным материалом искусственных имплантов является сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности, поскольку по своей структуре и механическим свойствам он похож на хрящевую ткань и биологически инертен в среде синовиальной жидкости.

Имея все исходные данные по механической и геометрической составляющей коленного сустава, а именно скорость, нагрузка и материал, необходимо определить испытательное оборудование, при помощи которого можно было бы изучать процессы трения и изнашивания в коленном суставе и в протезах, устанавливаемых в коленные суставы. При этом прямая имитация качательного движения в суставе не дает полного набора данных для подбора материалов протезов.

Наиболее целесообразно проводить имитационные испытания по стандартизованным методам испытаний полимерных материалов [5]. Это позволяет включить в отбор необходимых компонентов пар трения весь спектр потенциальных композитов на их основе. Поэтому, в качестве испытательного оборудования предлагается использовать машину трения СМТ-1 по схеме трения «вал-частичный вкладыш» (кинематическая пара IV класса) с площадью контакта 2 см^2 . Тогда с учетом требований к геометрии образцов, и приведенной выше информации, нормальная нагрузка на образец должна составлять от 100 до 700 Н .

Для оценки свойств триботехнических свойств материалов предлагается использовать карты износа, построенные в координатах нормальной нагрузки и скорости скольжения (PV-фактор), позволяющие оценить долговременную износостойкость.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований (ГПНИ задание 4.2.2).

1. R. Zhang, M. Lu, Z. Lan, Biochemical research of joint. 3. An experimental research on the Femur's knee joint of pongidae. Acta. Mech. Sin. 18(2), 181-185 (1986)
2. D.B. Kattelkamp, Chemical implications of knee biomechanics. Arch. Surg. 107 (3), 406-410 (1973)
3. D. Dowson, Medical engineering – the multi-disciplinary challenge. Proc. Inst. Mech. Eng. 205, 1-10 (1991)
4. S.F. Ermakov, N.K. Myshkin. Liquid-Crystal Nanomaterials – Springer Series in Materials Science – 2018
5. ISO/TR 8285:1990 Plain bearings — Evaluation of the tribological properties of polymer-based materials

РЕЦИКЛИНГ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Р.М. Долинская¹, Е.Н. Волнянко², Н.Р. Прокопчук¹¹Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь;
raisa_dolinskaya@mail.ru²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Повышение эффективности производства тесно связано с использованием вторичного сырья. Особенно остро проблема экономного расходования материалов стоит при производстве полимерных изделий, где отходы составляют в среднем 20—25% объема изготавливаемых изделий [1, 2].

Цель – исследовать возможность удешевления полимерной композиции за счет полного исключения из ее состава первичного эластомерного полимера.

Материалы и методы. В работе использовали первичный и вторичный синтетические каучуки, различные отходы полимерных производств. Исследования проводили с использованием следующих методов: ротационная вискозиметрия, вибрационная реометрия. Физико-механические свойства, такие как упруго-прочностные свойства, сопротивление раздиру, сопротивление истиранию и истираемость, твердость по Шору А определяли согласно стандартизированным методикам.

Результаты и их обсуждение. При переработке полимеры подвергаются воздействию высоких температур, сдвиговых напряжений, что способствует протеканию механохимических процессов и изменению структуры материала, влияющих на физико-механические и технологические свойства. Поэтому при использовании вторичного полимерного сырья для изготовления изделий необходимо учитывать остаточный ресурс работоспособности полимерной матрицы. Анализ полученных результатов в соответствии с [3] показал, что полимеры с ресурсом работоспособности 50% целесообразно использовать в композиционных материалах для изготовления неотчетственных изделий с коротким жизненным циклом. В качестве вторичных материальных ресурсов изучено использование отходов изношенных резиновых изделий для изготовления деталей технологического назначения. Важным моментом является время изготовления резинотехнических изделий (время вулканизации). Время вулканизации определяется составом вулканизирующей группы. Исследуемые образцы можно разбить на две группы: 1) образцы с использованием серы и сульфенамида Ц; 2) образцы с использованием серы и каптакса.

Использование таких вулканизирующих групп позволяет получать композиции, которые имеют широкое плато и высокую скорость вулканизации в главном периоде, что влияет на скорость вулканизации, следовательно, и на физико-механические показатели композиции, а все вместе – на технологические параметры процесса изготовления эластомерного материала и изделий на его основе. Как показали проведенные исследования, с увеличением времени вулканизации происходит улучшение всех физико-механических показателей вулканизатов. Наилучшее сочетание комплекса физико-механических показателей наблюдается при температуре 155 °С и времени вулканизации 150 мин. В рецептуре композиции использовали более 60% вулканизированной крошки, что позволяет уменьшить расход вулканизационной группы и снизить стоимость изделия. Проведенные исследования показали возможность полной замены каучука на дробленую резину в эластомерных композициях, из которых в производственных условиях изготовлены образцы изделий, соответствующие нормативной документации: покрытия полов производственных помещений, спортивных площадок и т.п. (рис.).

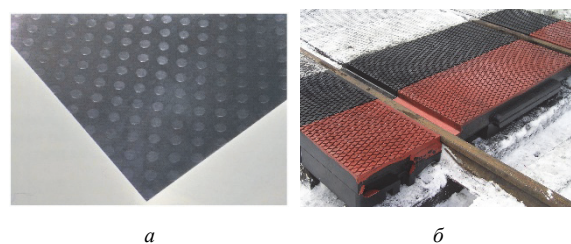


Рис. Напольные покрытия (а) и транспортные проезды (б) с использованием отходов резины

1. Вторичная переработка пластмасс / ред.Ф. Ла Мантия; пер. с англ. под ред. Г.Е.Заикова. – СПб.: Профессия, 2006. – 400с.
2. Корнев, А. Е. Технология эластомерных материалов / А. Е. Корнев, А. М. Буканов, О. Н. Шевердяев. – М: Химия, 2000. – 288 с.
3. Прокопчук Н.Р. Остаточный ресурс использования ПЭТ-упаковки как основы определения рациональных направлений ее повторной переработки / Н.Р.Прокопчук // Технологии переработки и упаковка. – 2006.- №4. – С.33 – 35.

РОЛЬ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ

И.И. Злотников¹, В.М. Шаповалов², И.Н. Ковалёва², Д.Л. Подобед³

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь,
zlotnikov@gstu.by

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

³Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, Гомель, Беларусь

Главным условием получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) с высокими показателями является обеспечение максимальной силы взаимодействия между поверхностью полимера и наполнителя. Обычно это достигается увеличением механической составляющей межфазного взаимодействия, например, переводом наполнителя в высокодисперсное состояние, что увеличивает разветвленность его поверхности, а также введением реагентов, создающих предпосылки для химического взаимодействия компонентов. Если методы увеличения механической и химической составляющей взаимодействия исчерпаны, то остается только возможность повышения межмолекулярного взаимодействия между поверхностями компонентов композита, что можно достичь подбором полимерной матрицы и наполнителя.

Цель работы — рассмотреть силы межфазного взаимодействия полимерной матрицы и наполнителя с точки зрения электромагнитной теории молекулярных сил и использовать полученные результаты для прогнозирования свойств ПКМ.

Наиболее общим способом расчета молекулярных сил взаимодействия двух твердых поверхностей является электромагнитная теория, развитая в работах Е.М. Лифшица [1], где было получено выражение для силы F , действующей на единицу площади каждого из двух тел, разделенных зазором шириной l , заполненным третьей средой. Если зазор мал по сравнению с длинами волн, характерными для спектров поглощения этих тел и температуры малы, то формула для силы взаимодействия имеет вид (индексы 1 и 2 относятся к телам, 3 к прослойке) [1]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \int_0^\infty [\varepsilon_1(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)] d\xi.$$

Однако экспериментальное определение комплексных диэлектрической проницаемости $\varepsilon''_{1,2,3}(\omega)$ и последующее вычисление силы является трудоемким процессом, поэтому в различных исследованиях предлагаются приближенные формулы для расчета силы взаимодействия. В монографии [2] предложена приближенная формула, в которой принимается во внимание поглощение только в области оптических частот:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{30})(\varepsilon_{20} - \varepsilon_{30})}{(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2}(\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2}[(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} + (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2}]},$$

где ω_0 — главная частота поглощения в спектрах всех трех веществ, ε_{10} , ε_{20} — статические диэлектрические проницаемости тел и прослойки — ε_{30} .

В «идеальном» ПКМ молекулярное взаимодействие протекает на границе полимера и наполнителя, причем можно считать, что между ними находится вакуум. В реальном ПКМ между поверхностью наполнителя и полимерной матрицы может присутствовать прослойка третьего вещества — либо специально введенного модификатора, либо образующаяся за счет окислов, адсорбированных загрязнений и продуктов, выделяющихся из полимера. Определение диэлектрических свойств этой прослойки, представляет собой очень трудную задачу при прогнозировании свойств ПКМ. Если применить последнюю формулу для «идеального» ПКМ, то диэлектрическую проницаемость ε_{30} следует принять за единицу, а ширину зазора принять равной среднему межатомному расстоянию. В этом случае:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0(\varepsilon_{10} - 1)(\varepsilon_{20} - 1)}{(\varepsilon_{10} + 1)^{1/2}(\varepsilon_{20} + 1)^{1/2}[(\varepsilon_{10} + 1)^{1/2} + (\varepsilon_{20} + 1)^{1/2}]},$$

ε_{10} , ε_{20} , — диэлектрические проницаемости полимера и наполнителя.

Проанализировав поведение функции $F(l)$ в двух крайних случаях, когда диэлектрические проницаемости полимера и наполнителя очень близки по величине $\varepsilon_{10} \approx \varepsilon_{20}$, например при наполнении эпоксидной смолы диоксидом кремния ($\varepsilon_{10} \approx \varepsilon_{20} \approx 3,8$) и когда отличаются очень сильно $\varepsilon_{10} \gg \varepsilon_{20}$, как в случае наполнения полиолефинов ($\varepsilon_{10} \approx 2,2$) оксидом алюминия ($\varepsilon_{20} \approx 10$) можно сделать заключение, что для того, чтобы сила взаимодействия полимера и наполнителя была как можно больше, их диэлектрические проницаемости должны быть как можно ближе по величине. Если поглощение происходит не на одной общей частоте ω_0 , а на нескольких, то их вклад в силу взаимодействия суммируется.

Таким образом, чтобы межфазное молекулярное взаимодействие полимерной матрицы и наполнителя было максимальным необходимо, чтобы:

- в спектрах полимера и наполнителя было как можно больше общих полос поглощения;
- если максимумы полос поглощения обоих веществ не совпадают, необходимо чтобы близкие полосы перекрывались как можно сильнее;
- величины статических диэлектрических проницаемостей полимера и наполнителя должны быть как можно ближе по величине.

1. Труды Е.М. Лифшица / Под ред. Л.П. Питаевского, Ю.Г. Рудого. — М.: Физматлит, 2004. — 648 с.
2. Израелашвили Дж. Межмолекулярные и поверхностные силы / Дж. Израелашвили. — М.: Научный мир, 2011. — 457 с.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

С.В. Зотов¹, Д.М. Лось², Н.С. Винидиктова¹,
В.М. Шаповалов¹, Е.А. Цветкова¹, В.А. Гольдаде¹, Р.Ю. Славников²¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь²Гомельский областной клинический онкологический диспансер, Гомель, Беларусь

Введение. В медицинской практике широкое применение имеют материалы типа «боллос», предназначенные для локализации излучения непосредственно на облучаемую зону. Такие материалы представляют собой гелеобразную субстанцию, выполненную из изоцианатных сополимеров, однако стоимость их очень высока, несмотря на кажущуюся простоту изделия.

Цель – разработка композитного материала с заданным диапазоном рентгеновской плотности и оптимальной эластичностью.

Материалы и методы. Для эксперимента изготавливали образцы по растворной технологии методом растворения полимеров и модификаторов в органических растворителях, а также методом смешения-каландрования. Образцы формировали в виде пластин из композитов толщиной 1 см и площадью 30×30 см. В качестве основы композитов использовали различные классы различающихся по эластичности полимерных материалов, модифицированных различными добавками, включая лекарственные препараты, полисахариды, пластификаторы, кислоты. Облучение образцов проводили при помощи линейного ускорителя.

Результаты и их обсуждение. Основные эксплуатационные свойства материалов типа «боллос» — эластичность, физическая и рентгеновская плотность. Эластичность определяет возможность безболезненного и плотного наложения боллоса на облучаемую поверхность и способность максимально точно повторить её топографию и рельеф. Известно, что для оценки плотности структур, визуализируемых методом компьютерной томографии, используется шкала ослабления рентгеновского излучения (шкала Хаунсфилда) [1, 2]. Диапазон единиц этой шкалы (денситометрических показателей), соответствующих степени ослабления рентгеновского излучения, составляет от –1024 до +3071, т.е. 4096 чисел ослабления. Средний показатель в шкале Хаунсфилда соответствует плотности воды, отрицательные величины шкалы соответствуют воздуху и жировой ткани, положительные — мягким тканям, костной ткани и более плотному веществу.

На рис. 1 представлены средние денситометрические показатели материала «боллос», применяемого в онкологических диспансерах и приобретаемого по импорту (далее — эталон, первая цифра — рентгеновская плотность в единицах Хаунсфилда, представляющая собой усредненное значение поглощения излучения). При оценке сложной анатомо-

гистологической структуры измерение её «рентгеновской плотности» не всегда даёт возможность с точностью утверждать, какая именно ткань визуализируется (к примеру, насыщенные жиром мягкие ткани имеют рентгеновскую плотность, близкую к плотности воды). Полученные результаты рентгеновской плотности представлены в табл. 1.

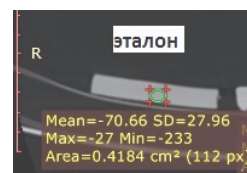


Рис. 1. КТ-скан исходного материала «боллос»

Таблица 1. Денситометрические показатели образцов

Композит	Рентгеновская плотность
Эталон	–70
На основе поливинилового спирта с функциональными добавками	–46...+67
На основе каучуков с функциональными добавками	+97
На основе акрилового клея с функциональными добавками	–120
На основе полиизобутилена с функциональными добавками	+300
На основе полиуретана с функциональными добавками	+68
Эталон после 5 лет эксплуатации	–67

Исследованные композиционные материалы близки по денситометрическим показателям к тканям живого организма. Варьируя рецептурным составом, можно добиться оптимальной рентгеновской плотности (в том числе приближенной к эталону) в сочетании с требуемой эластичностью изделия. Можно надеяться, что применение заменителей импортных боллосов в лечебной практике обеспечит повышение качества процедур лучевой терапии, уменьшение их стоимости и улучшение условий функционирования медицинских учреждений онкологического профиля. Разработка имеет выраженную социальную значимость ввиду направленности на импортозамещение в социально важной области.

1. Компьютерная томография: как разобраться в шкале Хаунсфилда? [Электронный ресурс]. URL: http://nld.by/youask/7_hounsfield/7_hounsfield.htm (дата обращения: 04.05.2022).
2. Компьютерная томография: Шкала Хаунсфилда [Электронный ресурс]. URL: http://polyguanidines.ru/a_guanidini&kompyuternaya-tomografiya&2.htm (дата обращения: 12.05.2022).

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА В ВАКУУМЕ

Л.Ф. Иванов¹, Л.А. Калинин¹, А.З. Скороход²

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, Ivanov@tut.by

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь.

Процесс лазерной абляции политетрафторэтилена в вакууме при производстве волокнисто-пористого материала достаточно сложный и зависит от множества факторов [1]. Одним из них является интенсивность лазерного излучения в зоне воздействия луча на полимер, его зависимость от конструктивных особенностей оборудования и технологических параметров процесса.

Цель работы провести математическое моделирование и экспериментальную проверку распределения и потерь лазерного излучения в технологической схеме процесса при получении волокнисто-пористого материала из ПТФЭ, а также влияние угла падения луча на ПТФЭ подложку на газообразование и соответственно выход готового продукта.

Материалы и оборудование.

Процесс абляции ПТФЭ проводили в вакуумной камере установки ВУП-4 оборудованной газовым CO₂ лазером ЛГН-703 с длиной волны 10,6 мкм. Для ввода излучения в камеру абляции использовали вакуум-плотное окно из монокристалла NaCl. Массу мишени и волокнистых продуктов абляции, а также реактивная составляющая газовых продуктов деструкции измеряли на аналитических весах, адаптированных к условиям вакуума в непрерывном режиме с точностью 0,1 мг. Перед экспериментом лазер включался на «прогон» в течение 1 мин для стабилизации мощности и модовой структуры луча. Луч лазера направлялся в центр мишени. Мощность лазера составляла 40 Вт. Время облучения составляло 5 секунд, интервал 5 секунд, следующее облучение и т.д.

В качестве сырья использовали стержни блочного политетрафторэтилена производства ПАО «Галоген». Измерение мощности излучения проводили с использованием измерителя мощности ТИ-3.

Результаты и их обсуждение.

Рассматривалась краевая задача для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), описывающих распределение интенсивности оптического излучения в пространстве между источником (лазером) и зеркалом, заполненным некоторой средой. Средства СКА (система компьютерной алгебры) *Mathcad*, реализующие алгоритм «прицеливания», позволяют решать краевые задачи для большого количества ОДУ, в которых часть граничных условий поставлена в начальной точке интервала, а остальная часть — в его конечной точке. Предло-

женный алгоритм определения недостающего граничного условия позволяет дать практические инженерные рекомендации при выборе количества зеркал, геометрических размеров вакуумной камеры и расположенных в ней мишени и подложки. Экспериментальная проверка прямыми измерениями интенсивности излучения по предлагаемой схеме подтвердила результаты математического моделирования.

Вторым моментом, связанным с интенсивностью излучения, является изучение влияния угла падения луча лазера на ПТФЭ подложку в процессе лазерной абляции. В данном случае играют роль два фактора – отражение части излучения от поверхности образца и уменьшение интенсивности за счет увеличения площади пятна излучения. Первое исследовать достаточно сложно, поэтому акцент сделан на втором факторе.

Образец размещали на весах на специально изготовленном устройстве, позволяющем дискретно менять угол наклона от 0 до 75° с шагом 15°. Во время облучения фиксировали весовые показатели процесса, а после извлечения оценивали площадь пятна кратера на поверхности образца.

Таблица 1. Влияние угла падения луча на процесс лазерной абляции ПТФЭ

Угол наклона образца, град.	Площадь пятна, см ²	Интенсивность излучения, Вт/см ²	Реактивный отклик, мг
0	0,87	46,0	16,5
15	1,01	39,6	13,3
30	1,09	36,7	9,5
45	1,19	33,6	9,0
60	1,28	31,3	0,4
75	2,01	19,9	0,0

Таким образом установлено, что оптимальным углом падения луча лазера на ПТФЭ подложку является угол порядка 30°, поскольку при меньшем значении продуктами абляции загрязняется окно из монокристалла NaCl, что приводит к его разрушению, а при больших углах скорость абляции падает, приводя к снижению выхода волокнисто-пористых материалов.

1. I.A. Frolov, S.R. Allayarov, E.M. Tolstoplyatov, A.V. Utkin, P.N. Grakovich, L.F. Ivanov, V.M. Makarenko. Study of the Recoil Impulse of Gaseous Products of IR Laser Ablation of Polytetrafluoroethylene // High Energy Chemistry, 2022, Vol. 56, No. 1, P. 54-59.

ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИВИТЫХ СОПОЛИМЕРОВ КУКУРУЗНОГО КРАХМАЛА С АКРИЛАМИДОМ

И.А. Климовцова, Е.К. Фомина, Е.В. Гринюк, А.А. Федоренко, Д.Л. Кудрявский

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; sashfedorenko@gmail.com

Прививочная сополимеризация является одним из наиболее простых и эффективных способов химической модификации макромолекул [1]. Особый интерес представляют привитые сополимеры полисахаридов, в частности, крахмала и акриловых мономеров, которые совмещают свойства природных (биосовместимость, биоразлагаемость, нетоксичность) и синтетических (механическая прочность, высокая водопоглощающая способность) полимеров [2]. Крахмал является природным полимером с отличными диффузионными свойствами и высокой набухающей способностью. Происхождение и вид крахмала оказывает значительное влияние на степень прививки [3].

Цель. Получение гидрогелей на основе привитых сополимеров кукурузного крахмала (Кр) с акриламидом (АА).

Результаты эксперимента и их обсуждение.

Сшитые сополимеры Кр с АА синтезировали путем иницированной свободнорадикальной полимеризации при соотношении Кр-АА (2–1, 1–1, 1–2) в водной среде в присутствии инициатора – персульфата аммония (ПСА) и сшивающего агента – N, N'-метилена-бис-акриламида (МБА).

Предварительно Кр желатинизировали в воде при $T = 80\text{--}95\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30–40 мин при постоянном перемешивании на магнитной мешалке. К охлажденному Кр добавляли раствор АА. Смесь перемешивали до однородного состояния при $T = 40\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем в реакционную смесь вводили ПСА (0,5% от массы реагентов). Реакцию прививки проводили при $45\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч. При $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вводили МБА в количестве 1,0 мас.% от массы Кр и АА. Реакционную смесь перемешивали при $T = 65\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30–40 мин. Синтезированные сополимеры промывали дистиллированной водой несколько раз для удаления гомополимера, затем сушили до постоянного веса. Прививка АА к цепям Кр подтверждена с помощью совмещенного термического анализа и Фурье-ИК спектроскопии.

Полученные сополимеры гидролизовали в 1 н растворе NaOH в различных условиях: при $T = 20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 2 ч и 6 ч, а также при $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 2 ч. Гидролиз проводили при интенсивном перемешивании на магнитной мешалке. Гидролизированные гидрогели промывали дистиллированной водой до достижения нейтрального pH и сушили при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянного веса.

Степень набухания синтезированных гидрогелей определяли гравиметрически (рис. 1). Установлено, что существенное увеличение степени набухания гидролизированных гидрогелей связано с появлением COO^- групп в полиакрилатных цепях.

Реологические свойства равновесно набухших в дистиллированной воде гидрогелей определяли на ротационном вискозиметре RHEOTEST RN 5.1 (Германия) в осцилляционном режиме (рис. 2).

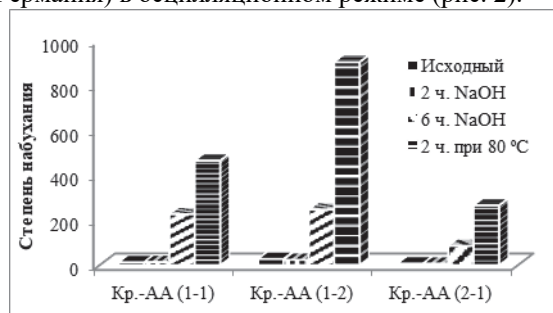


Рис. 1. Степень набухания гидролизированных привитых сополимеров Кр с АА

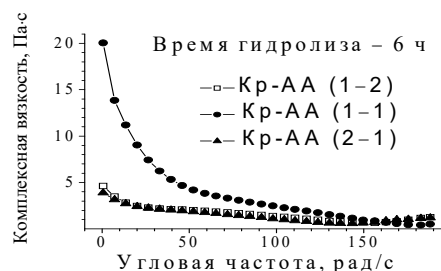


Рис. 2. Зависимость комплексной вязкости от угловой частоты гидролизированных гидрогелей на основе привитых сополимеров Кр с АА

Таким образом, в лабораторных условиях отработана методика сополимеризации Кр с АА. Установлено, что такие параметры прививочной сополимеризации, как время реакции, температура, соотношение крахмала и мономеров, концентрация инициатора и сшивающего агента влияют на реологические и абсорбционные свойства полученных гелей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта X22УЗБ-025).

- Vega-Hernández M. Á., Cano-Díaz G. S., Vivaldo-Lima E., Rosas-Aburto A., Hernández-Luna M. G., Martínez A., Palacios-Alquisira J., Mohammadi Y., Penlidis A. A Review on the synthesis, characterization, and modeling of polymer grafting // *Processes*. — 2021 (9), № 375, 92.
- Kumar D., Pandey J., Raj V., Kumar P. A review on the modification of polysaccharide through graft copolymerization for various potential applications // *The Open Medic. Chem. J.* — 2017 (11), 109–126.
- Huiyuan L., Dong F., Wang Q., Li Y., Xiong Y. Construction of porous starch-based hydrogel via regulating the ratio of amylopectin/amylose for enhanced water-retention // *Molecules*. — 2021 (26), № 13, 3999–4011.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТРЕНИЯ НА РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ

Г.В. Кожевникова

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук
Беларуси», Минск, Беларусь; fti@tut.by

Введение. При крупносерийном и массовом производстве технология поперечно-клиновой прокатки (ПКП) металлических ступенчатых валов по экономичности вне конкуренции с иными способами изготовления. Однако эту технологию сопровождает один существенный недостаток: это высокая вероятность вскрытия осевой полости при прокатке при недостаточной пластичности металла, так называемый эффект Маннесмана, что часто является неисправимым браком. Этот дефект является существенным ограничением для реализации прогрессивной технологии.

Согласно деформационной феноменологической теории разрушения металлов и сплавов при пластическом течении на оси заготовки при прокатке реализуется максимальные растягивающие напряжения, и при достижении накопленными деформациями предельных значений, увеличивающиеся в своих размерах при прокатке микротрещины объединяются в макротрещину, которая трансформируется в осевую полость.

Обычно задача повышения ресурса пластичности изделия решается за счет оптимизации параметров ПКП: уменьшения угла заострения β клинового инструмента, увеличения угла наклона боковой грани α инструмента, оптимизации температуры нагрева заготовки, оптимизации степени обжатия при прокатке.

Цель работы состоит в оптимизации процесса ПКП путем изменения контактного трения.

Результаты и их обсуждение. Предложен способ [1], который так же позволяет оптимизировать параметры прокатки традиционным образом, и дополнительно к этому увеличить ресурс пластичности за счет действий, предусмотренных при реализации предложенного способа ПКП.

Пластичность материала на оси заготовки при прокатке количественно описывается ресурсом пластичности λ :

$$\lambda = 1 - \frac{\Lambda^*}{\Lambda_{\text{пр}}^*}, \quad (1)$$

где Λ^* и $\Lambda_{\text{пр}}^*$ — текущая степень деформации сдвига при разнонаправленном немономонном деформировании (накопленные деформации при ПКП) и ее предельная степень деформации сдвига при вскрытии полости, соответственно.

Ресурс пластичности λ в исходной заготовке равен 1, при прокатке он уменьшается, при разрушении равен нулю.

Нами предложено новое поколение технологии

ПКП, где за счет изменения сил трения на контакте горячая заготовка — инструмент изменяют напряженное состояние в очаге деформации при прокатке металла, и тем самым значительно снижают вероятность его разрушения. Предложенный способ реализуется при холодной, теплой, горячей ПКП, а также их способами: реверсивной ПКП и ПКП одним инструментом. Согласно предложенному способу заготовку в процессе ПКП принудительно тормозят. Процесс ПКП с параметрами, изложенными выше, тормозили моментом сил, равным 30 % момента, способствующего ее вращению. Силы трения при этом также увеличивались на 30 %.

Данные получены компьютерным расчетом процесса ПКП по двум указанным вариантам с параметрами процесса: материал сталь 45 ГОСТ 1050–88; исходный диаметр 28 мм; степень обжатия 1,60; скорость прокатки 0,3 м/с; температура нагрева заготовки 1100 °С; угол наклона боковой грани α клинового инструмента 30°; угол заострения β клинового инструмента 9°. Усредненное значение среднего напряжения σ/K на оси заготовки за время прокатки от 0 до 1,1565 с для известного способа ПКП составило 0,2236, для предложенного: –0,2405. то есть в 1,93 раза меньше.

Накопленные деформации для известного способа составили 6,44, для предложенного 6,50; предельная степень деформации сдвига стали 45 при температуре 1100 °С для известного способа составляет 13,4, для предложенного 29,05.

Компьютерным моделированием для этого процесса определили усредненное среднее напряжение на оси заготовки: –0,2405 (изменилось с растягивающего на сжимающее напряжение), накопленные деформации: 6,52, предельную степень деформации сдвига для найденного среднего напряжения: 29,05. В итоге по отношению к известному способу прокатки определили по формуле (1) ресурс пластичности после действий по предложенного способа, он составил 0,776 или на 50 % выше, чем в известном способе.

Вывод. Увеличение сил трения для данных условий ПКП на 30% увеличивают ресурс пластичности прокатанной детали на 50%.

1. Способ поперечно-клиновой прокатки металлов и сплавов: заявка № а 20200301 Респ. Беларусь, МПК В21 Н 1/18 / Шукин В.Я., Кожевникова Г.В., Кожевников Д.А., Шу Сюздао, Ван Ин, Юй Тао; заявители Шукин В.Я., Кожевникова Г.В., Кожевников Д.А., Шу Сюздао, Ван Ин, Юй Тао. — заявл. 30.11.2020.

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ ОТ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ

Г.В. Кожевникова¹, С.С. Дубенец¹, В.Я. Щукин²

¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Постановка цели. Изучение зависимости напряжённого состояния в очаге деформации при продольной прокатке от контактного трения.

Материалы и методы. Исследование проведено аналитическими методами графического построения полей линий скольжения и верхнеграницной оценки. Изучался процесс продольной прокатки валковым инструментом диаметром 200 мм ленты толщиной 70 мм. Межвалковой зазор при этом составил 53,8 мм. Степень деформации 1,3. Геометрическая модель контактной поверхности трения представлена на рис. 1 [1].

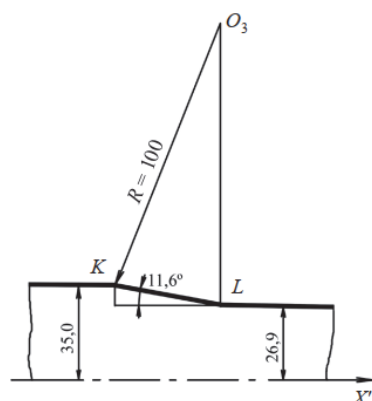


Рис. 1. Геометрическая модель контактной поверхности процесса продольной прокатки цилиндрическими валками

Вычисленная длина линии контакта составила 40,28 мм. Поскольку обрабатываемый материал принимаем как идеальное пластическое тело, то постоянную пластическую материала представим как K . Для определения контактного напряжения была применена верхнеграницная оценка расчёта. Равенство сил, которые препятствуют и в тоже время способствуют процессу деформирования (по оси OX'), позволяет определить:

$$P_m/K \cdot l_K \cdot \sin\varphi_0 = \mu_r \cdot l_K \cdot \cos\varphi_0, \quad (1)$$

где l_K — протяжённость контактной поверхности, мм; φ_0 — наклон оси OX' к контактной поверхности, градус.

Вычисленный по формуле (1) коэффициент трения по Прандтлю составил $\mu = 0,64$. Среднее зна-

чение напряжений на контактной поверхности находится из условия

$$P_m/K = \sigma_z/K = \sigma/K - \sin 2\varphi, \quad (2)$$

где φ — угол MKL (рис. 2).

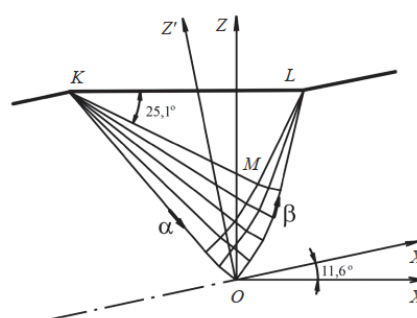


Рис. 2. Поле линий скольжения при процессе продольной прокатки со степенью обжатия 1,3 [1].

По результатам расчётов среднее напряжение при прокатке $\sigma/K = -2,36$.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что сопротивление движению прокатываемой заготовки сопровождается ростом удельных сил трения и увеличением значения среднего напряжения в центральной зоне заготовки.

В случае, когда условия протекания процесса деформирования способствуют перемещению заготовки, трение на контактных поверхностях снижается. Происходит снижение значений параметров напряжений, что способствует росту ресурса пластичности материала по сравнению с основным значением при прокатке.

В качестве вывода можно отметить, что регулируя силы трения на контактных поверхностях, можно увеличить степень обжатия и повысить ресурс пластичности прокатываемого материала.

1. Кожевникова, Г. В. Пластические свойства металлов и сплавов: феноменологическая деформационная теория разрушения при пластическом течении / Г. В. Кожевникова, В. Я. Щукин; Нац. акад. наук Беларуси, Физ.-техн. ин-т. — Минск: Беларуская навука, 2021. — 277 с.: ил. — ISBN 978-985-08-2685-5.

БИОУТИЛИЗИРУЕМЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

О.В. Конакова, Н.С. Винидиктова, В.М. Шаповалов, С.В. Зотов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; konakovaolga08@gmail.com

Введение. Одной из значительных проблем современного мира является накопление твердых бытовых отходов на основе полимеров. Предпринимаются многочисленные попытки создания биоутилизируемых (способных к деградации в почве) материалов, способных заменить крупнотоннажные синтетические пластмассы в изделиях бытового и технического назначения.

Цель настоящей работы — сформулировать основные тенденции в данном направлении и рассмотреть возможности по получению материалов для последующего изготовления тары и посуды одноразового применения.

Материалы и методы. Исследованы упаковочные материалы различных производителей, которые представлены в сфере торговли с указанием на их способность к практически полному биоразложению в течение 1—1,5 лет. Скорость биодеструкции оценивали, помещая образцы в почву и определяя изменение их внешнего вида и массы.

Результаты и их обсуждение. Большинство синтетических полимеров обладает крайне низкой способностью к биоутилизации в окружающей среде. Применение для изготовления широкого круга изделий немногочисленных заведомо биоразлагаемых синтетических полимеров (полилактиды и др.) ограничивается их высокой стоимостью. Использование для этой цели возобновляемого органо-растительного сырья имеет свои ограничения ввиду сложности его технологической переработки в форму устойчивые изделия с прогнозируемыми физико-механическими характеристиками. Тем самым, актуален поиск разумных сочетаний органо-растительных компонентов с незначительными количествами связующих.

Нами выдвинута гипотеза о том, что следует в максимальной степени отойти от идеи применения синтетических полимеров, при этом совмещение органо-растительных компонентов в единую стабильную композиционную систему может быть стимулировано специфическими функциональными добавками в сочетании с воздействием физических полей различной интенсивности.

Экспериментальная проверка гипотезы должна базироваться на следующих принципах:

- доскональное исследование номенклатуры материалов, позиционируемых как biodegradable, и их компонентного состава;

- научно обоснованный выбор органо-растительного сырья, его морфологических признаков и дисперсности;

- подбор полимерного связующего (оптимально — технологичного биополимера), которое способно полностью биоутилизироваться, не переходя в форму микропластика;

- выбор технологии гомогенизации компонентов;

- анализ роли и масштаба воздействия физических полей.

Современный уровень разработок в области биоразлагаемых материалов может быть охарактеризован попытками применить:

- методы химического модифицирования природных полимеров (преимущественно полисахаридов — крахмал, целлюлоза и др.) с целью повышения технологичности переработки;

- методы химического модифицирования синтетических полимеров с целью обеспечить совмещение их с органо-растительным сырьем;

- методы смешения компонентов, усиливающие роль органо-растительной фазы в ускорении механического разрушения утилизируемого изделия за счет разрыхления и интенсификации действия воды и микроорганизмов.

Экспериментально установлено, что доступные для исследования «biodegradable» материалы зарубежного производства оказались не соответствующими критерию полной биоразлагаемости. В настоящий момент ведутся работы по подбору оптимальных комбинаций компонентов с минимальным содержанием синтетического связующего. Следует изучить способность функциональных компонентов к физической и физико-химической активации, что должно благоприятно повлиять на их взаимную совместимость.

Заключение. Сформулированы основные тенденции в создании биоутилизируемых материалов. Выдвинута гипотеза о новых возможностях получения таких материалов для изготовления тары и посуды одноразового применения, состоящая в создании условий для максимального отхода от использования синтетических полимеров и обеспечения совмещения органо-растительных компонентов в единую стабильную композиционную систему. Замещение в одноразовой таре и посуде традиционных синтетических пластиков активными биоразлагаемыми материалами сможет значительно снизить нагрузку на окружающую среду.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 4.2.2, НИР 2.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОЛИМЕР–ДИОКСИД КРЕМНИЯ

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

Государственное научное Учреждение «Физико-технический институт национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; anatKuzei@mail.ru

Повышение физико-химических характеристик металлических сплавов достигается несколькими методами, одним из которых является формирование в α -твёрдом растворе (матрице) ультрадисперсных частиц когерентных или (и) не когерентных с кристаллической решёткой α -твёрдого раствора. Структуры, формирующиеся при введении в олигомеры ультрадисперсных частиц с функциональными поверхностными группами, и образующиеся в результате взаимодействия олигомеров с органическими соединениями кремния можно рассматривать как аналоги структур в сплавах и композиционных материалах. В работе методами дифференциального термического анализа, электронной сканирующей микроскопии изучено влияние ультрадисперсной фазы на структуру и физико-химические характеристики композиционных материалов системы фенолформальдегидная смола – диоксид кремния. В качестве диоксида кремния использовали пирогенный диоксид кремния с удельной поверхностью $300 \text{ м}^2/\text{г}$ и продукты гидролиза этилсиликата. Композиционные материалы получали горячим прессованием шихты при 415K . Структуру композиционных материалов выявляли обработкой в плавиковой кислоте.

Морфологии поверхностей разрушения композиционных материалов с концентрацией диоксида кремния 40; 30 об.% представляет собой множество выступов со сглаженными вершинами на фоне которых расположены выступы с острыми вершинами и гранями. Микроструктуру композиционных материалов формируют множество округлых ($0,1\text{—}0,5 \text{ мкм}$) и бесформенных глобул. Твёрдость композиционных материалов составляет 47, 41 HRB. Морфология поверхностей разрушения композиционных материалов содержащих 20; 10 об. % диоксида кремния представляет собой округлые выступы разделённые плоскими участками (рис. 1, а). Микроструктура композиционных материалов представляет собой множество бесформенных гребней, разделённых впадинами (рис. 1, б). Длины гребней $1\text{—}8 \text{ мкм}$. Твёрдость композиционных материалов составляет 36, 29 HRB. Введение диоксида кремния в фенолформальдегидную смолу снижает интенсивность тепловыделения и тепловой эффект полимеризации.

Морфология поверхностей разрушения и микроструктура композиционных материалов показывают, что композиционные материалы наследуют исходную, «структуру» порошка из агломератов различной плотности и размеров. Формирование композиционных материалов протекает на стадии смачивания и пропитывания агломератов фено-

лоформальдегидной смолой. Высокие значения твёрдости материалов, морфологии поверхностей разрушения, микроструктура композиционных материалов указывают на сильное межзатомное взаимодействие в системе диоксид кремния – фенолформальдегидная смола, приводящее к формированию суспензии (эмульсии) из множества ступок. Формирование волокнистых текстур в композиционных материалах определяется режимами горячего прессования композиционных порошков.

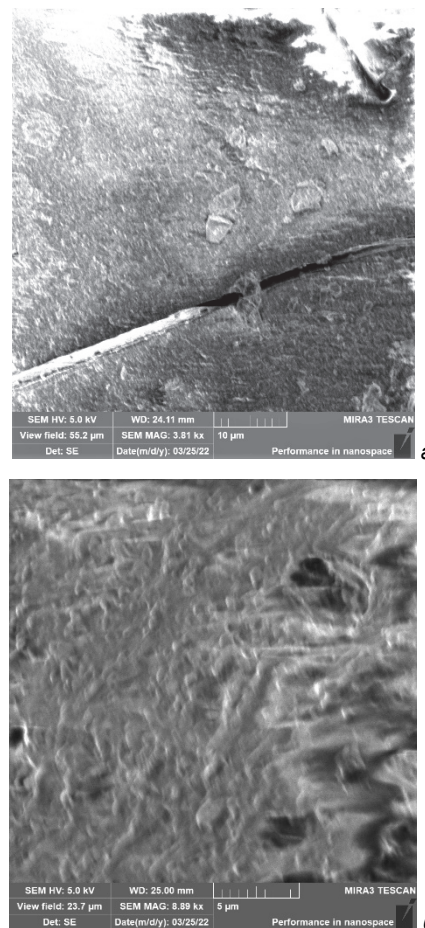


Рисунок 1 – Морфология поверхности разрушения (а) и микроструктура (б) композиционного материала системы полимер/диоксид кремния (10 об. %)

1. Кудина Е.Ф. Особенности получения высокодисперсных гибридных материалов / Е.Ф. Кудина // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. в 3 кн. кн. 1. Материаловедение / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 131 – 138.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПОЛНИТЕЛЯ НА СТРУКТУРУ СВЯЗУЮЩЕГО НА ОСНОВЕ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ

П.А. Костюкевич, Ж.Е. Макарова, А.В. Францкевич

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; mzhe_miam@tut.by

В металлических сплавах можно выделить два типа микроструктур, образование которых приводит к значительному увеличению их физико-химических характеристик и эксплуатационных показателей. К первому типу можно отнести структуру алюминиевых сплавов системы Al-Cu, представляющую собой матрицу из твёрдого раствора и расположенных в ней множества наноразмерных частиц когерентных (Q' -фаза) и полукogerентных с матрицей раствора (Q'' -фаза) [1]. Вторым типом является структура из ультрадисперсных частиц (карбидов вольфрама, титана) и объединённых прослойками металла (Co) [2]. Аналогами подобных структур являются структуры на основе матриц из полимера и ультрадисперсных частиц наполнителей, в которых связь между компонентами обеспечивается химическим либо адгезионным взаимодействием.

Объектами исследования являются композиционные материалы системы полимер-диоксид кремния. В качестве полимера использовали фенолформальдегидную смолу марки СФП-012А, диоксида кремния – пирогенный диоксид кремния с удельной поверхностью 300 г/м². Концентрация диоксида кремния в композиционных материалах составляла 5 об. % и 10 об. %. Композиционные материалы получали горячим прессованием прекурсоров полимер-диоксид кремния при 340К, и давлении 40 МПа. «Микроструктуру» композиционных материалов выявляли обработкой их поверхности фтористоводородной кислотой. Обработка поверхности композиционных материалов во фтористоводородной кислоте приводит к формированию на их поверхности различных микрорельефов (рис. 1).

В композиционном материале с 5 об. % диоксида кремния микроструктуры образованы множеством округлых выступов и гребней (рис. 1 а); в композиционном материале с 10 об. % диоксида кремния множеством гребней различных форм и округлых выступов (рис. 1 б). твёрдость композиционных материалов с 5 об. % и 10 об. % диоксида кремния составляет 81 и 83 HRT₁₅ соответственно, фенолформальдегидной смолы 72 HRT₁₅. После отжига при 485К в течение 5 минут, твёрдость композиционных материалов составила 84 и 87 HRT₁₅, фенолформальдегидной смолы 74 HRT₁₅. После пяти минут отжига при 525К твёрдость композиционных материалов составила 84 и 89 HRT₁₅, фенолформальдегидной смолы 70 HRT₁₅.

Обработка поверхности композиционных материалов полимер-диоксид кремния должна привести

к растворению частиц диоксида кремния и образованию микрорельефов из множества углублений в полимерной матрице. Формирование структуры композиционных материалов можно связать со следующими процессами. Размеры индивидуальных частиц пирогенного диоксида кремния не превышают 50 нм, однако, сильное межчастичное взаимодействие приводит к образованию агломератов различных размеров и плотности. Инфильтрация раствора полимера в агломератах приводит к образованию псевдоземлюли, из микро-областей раствора с различным содержанием диоксида кремния, которая при последующих технологических переделах превращается в частицы прекурсора с неравномерным распределением диоксида кремния в матрице, которые при последующем горячем прессовании формируют структуры композиционных материалов. Увеличение твёрдости композиционных материалов с диоксидом кремния при отжигах может быть связано как с процессом взаимодействия функциональных групп (Si-OH) на поверхности частиц диоксида кремния с функциональными группами (ОН) полимера. Снижение твёрдости фенолформальдегидной смолы при отжигах и увеличение твёрдости композиционных материалов полимер-диоксид кремния свидетельствуют о протекании процесса полимеризации в композиционном материале. Композиционные материалы полимер-диоксид кремния могут использоваться как связующее для получения алмазо-содержащих композиционных материалов.

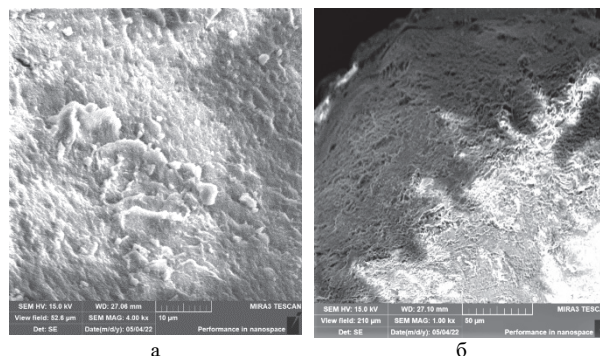


Рисунок 1 — Морфология поверхности композиционных материалов полимер-диоксид кремния после обработки во фтористоводородной кислоте. а, б — 5 об. % и 10 об. % соответственно

1. Буйнов Н. Н. Распад металлических твёрдых растворов / Н. Н. Буйнов, Р. Р. Захарова. – М.: Металлургия, 1964. – 143 с.
2. Киффер Р. Твёрдые сплавы / Р. Киффер, Ф. Бенезовский. – М.: Металлургия, 1971 г. – 392 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКТОПЛАСТОВ В КАЧЕСТВЕ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Е.Ф. Кудина^{1,2}, И.В. Приходько¹, П.А. Курицын¹

¹Белорусский государственный университет транспорта; *iv_prixodko@mail.ru*

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь

Важным направлением в электротехнике является изоляция различного вида деталей и оборудования покрытиями из полимерных композиционных материалов. Такие материалы должны обладать высокими диэлектрическими и механическими свойствами, а также сохранять их в условиях воздействия климатических факторов при заданных электрических параметрах работающего электрооборудования.

Экспериментальные исследования показали, что, сочетая в определенных соотношениях спиртовой раствор поливинилбутираля (ПВБ) с эпоксидной смолой (ЭД), отверждённой полиэтиленполиамином (ПЭПА), можно получить композиты для практического применения в качестве диэлектрического покрытия или конструкционного изоляционного материала.

Как показали результаты визуальной оценки качества покрытий сочетание компонентов в соотношении ЭД-20 — 71,4±0,5 %, ПЭПА — 14,3±0,5 %, раствор ПВБ — 14,3±0,5 % позволяет получить однородный бездефектный материал. Содержание отвердителя неоднозначно отражается на качестве композиционного материала (КМ), его однородности и времени формирования. Количество отвердителя в составе ограничивается 20 %, более высокая концентрация приводит к интенсификации процессов полимеризации с выделением большого количества тепла, состав вспенивается и образует композит с пористой структурой.

Исходя из максимального содержания отвердителя при оптимальном сочетании других компонентов, получены составы покрытий с содержанием ПЭПА в диапазоне от 10 до 20 %. При концентрации отвердителя в количестве 11 % (образец 1) в КМ процесс полимеризации протекает с низкой скоростью, вследствие чего формируется композит с образованием неоднородных областей. При содержании 17 % ПЭПА (образец 3) отмечено образование небольшого количества пузырей, обусловленное температурными процессами, протекающими в КМ. Это негативно отражается на качестве получаемого материала. Таким образом, оптимальный состав с максимально однородной структурой соответствует 14±0,5 % отвердителя от общей массы состава (образец 2). Из полученных составов формировали покрытия на металлических подложках, которые исследовали на адгезионную прочность к металлу методом решетчатого надреза. Показано, что сформированные покрытия обладают хорошими прочност-

ными и адгезионными свойствами. Полученные надрезы имеют четкие границы и не являются сплошными. При сравнении составов с различным содержанием отвердителя, наиболее высокое качество покрытия показал образец 2, поскольку образцы 1 и 3 имеют небольшие сколы в некоторых местах надреза в виду большей хрупкости составов.

Высокое значение объемного удельного сопротивления полученного при нормальных климатических условиях позволяет судить о возможности использования материала в качестве диэлектрических покрытий высоковольтного оборудования. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить зависимость удельного объемного электрического сопротивления от концентрации отвердителя, которая имеет экстремальный характер. Величина критического содержания отвердителя лежит в диапазоне 13,5—14,5 %.

Существенное воздействие на объекты эксплуатации оказывают условия и, в значительной мере, температура, создаваемая работающим тепловыделяющим оборудованием. По результатам оценки экспериментальных данных (рисунок 1) установлено, что образец 2 обладает наиболее высокими изоляционными свойствами во всем исследуемом температурном диапазоне.

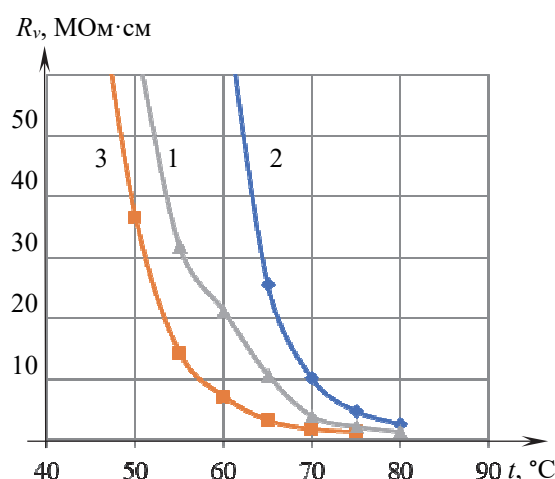


Рис. 1 Зависимость удельного объемного сопротивления от температуры

По-видимому, это достигается за счет более однородной структуры образца 2 в сравнении с образцами 1 и 3, и, как следствие, более качественной сшивки органической матрицы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОЗАДИРНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

М.А. Леванцевич¹, Н.Н. Максимченко¹, Е.В. Пилипчук²¹Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; levancev@mail.ru²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Введение. Известно, что в процессе модификации поверхности пластическим деформированием с одновременным формированием слоя покрытия проволоочными щетками (процесс, именуемый в различных источниках как «Фрикционное плакирование», «Деформационное плакирование», «Брашинг») использование в качестве материалов покрытий (доноров) композитов, легированных металлическими и неметаллическими твердосмазочными добавками, типа графита, дисульфида молибдена, наноразмерной шихты УДАГ и др., способствует улучшению триботехнических характеристик трущихся деталей. Однако на основе опыта промышленного применения этих композитов установлено, что повышенная концентрация (более 1 мас.%) легирующих неметаллических добавок в доноре приводит к повышенной запыленности в рабочей зоне при нанесении покрытий и снижению производительности по причине необходимости увеличения продолжительности обработки. Триботехнические свойства композитов с меньшей концентрацией неметаллических добавок и возможности их применения в качестве доноров пока еще недостаточно изучены, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

Цель исследований заключалась в определении триботехнических характеристик и критической нагрузки задира композитов, предполагаемых к использованию в качестве доноров в процессе модификации поверхности пластическим деформированием с одновременным формированием слоя покрытия.

Материалы и методы исследований. Объект исследований — пары трения «диск-полусфера». Образцы — диски диаметром 70 мм и толщиной 50 мм, выполненные из латунного проката Л63 (ГОСТ 15527-2004) (образец № 5) и спеченные из смесей порошков меди М1, олова, свинца, графита, дисульфида молибдена и алмазно-графитной шихты УДАГ следующего состава: № 1 — Cu + до 10 мас.% Sn; № 2 — Cu + до 9 мас.% Sn + до 1 мас.% MoS₂ + УДАГ; № 3 — Cu + до 5 мас.% Sn + до 15 мас.% Pb + до 1 мас.% C + MoS₂; № 4 — Cu + до 1 мас.% УДАГ. Контртело — сферический индентор (радиус сферы 500 мм) из стали 40Х объемной закалки (HRC 43—45). Трение индентора по плоской поверхности диска ($R_a = 0,3\text{—}0,4$ мкм) выполняли на автоматизированном трибometре одностороннего вращения.

В процессе испытаний регистрировали коэффициент трения скольжения и критическую нагрузку задира образцов. Условия испытаний: скорость

вращения диска — $7,3\text{ мин}^{-1}$, относительная скорость скольжения индентора по диску — $0,01\text{ м/с}$, удельное давление — 20, 40, 60 МПа (ступенчатое нагружение до задира), трение без смазочного материала, длительность испытания на каждой ступени нагружения — 10 мин.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при удельной нагрузке 60 МПа на поверхности диска из латуни Л63 возник задр, сопровождаемый резким увеличением коэффициента трения скольжения от 0,16 до 0,332 (рис. 1, линия 5). Остальные образцы выдержали испытания. При этом наблюдалось, что после удельной нагрузки 40 МПа характер трения в испытываемых парах с дисками № 1, 2, 3, 4 (рис. 1) стабилизировался. При дальнейшем нагружении до 60 МПа коэффициент трения скольжения в парах № 1, 2, 3 незначительно вырос и составил в среднем 0,177; 0,213; 0,14 соответственно. В паре с диском № 4 с ростом удельной нагрузки имело место снижение коэффициента трения скольжения до 0,14.

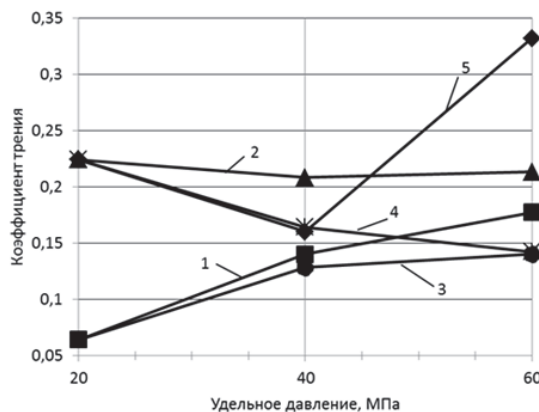


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения скольжения от удельного давления

Заключение. В условиях проводимых испытаний критическая нагрузка задира для диска из латуни Л63 составила 60 МПа. Остальные диски выдержали испытания. При этом отмечено, что в зависимости от материала диска с повышением нагрузки коэффициент трения скольжения может либо снижаться, либо увеличиваться, либо практически оставаться неизменным.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T21ЭТ-005).

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ПОКРЫТИЙ ОСНАТКИ ПУЛТРУДЕРОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ФТОРПОЛИМЕРОВ

К.А. Лобанов¹, А.С. Васильева², В.В. Коврига²

¹ЗАО «Завод АНД Газтрубпласт»

²ООО «Группа Полимертепло»

Нанесение фторопластовых покрытий на технологическую оснастку пултрудеров, обеспечивающих производство труб из сшитого полиэтилена, широко используют разные виды фторполимеров. Поскольку механические свойства получаемых покрытий прямо определяют ресурс работы технологической линии, решалась задача подбора комплекса методов оценки покрытия. На ряду с общеизвестными методами, связанными с определением толщины и шероховатости поверхности, нанесённого фторопластового покрытия, разрабатывались методики определения температурной зависимости коэффициента трения в широком (до 250 °С) диапазоне температур.

Чертёж прибора для определения температурной зависимости коэффициента трения представлен на чертеже на рис. 1.

А также, методы оценки послойной износостойкости покрытия. Для этого были использованы образцы-свидетели в форме дисков диаметром 100 мм, для определения износостойкости и образцы свидетели для определения коэффициента трения имевшие вид металлических листов толщиной 2 мм и размер 40×60 мм.

Образец сшитого полиэтилена, который протаскивался между двух сжимаемых поверхностей, покрытых фторполимером, имел размер 10×10×4 мм. Кроме этих показателей на образцах свидетелях в форме дисков проводилось определение твёрдости покрытий по методике твёрдого карандаша.

На рис. 2 приведена температурная зависимость коэффициента трения сшитого полиэтилена.

В качестве фторполимеров, используемых для нанесения на металлические поверхности оснастки использовались три системы:

Система на фторированных эфирах фирмы FinCoatingSystems г. Санкт-Петербург

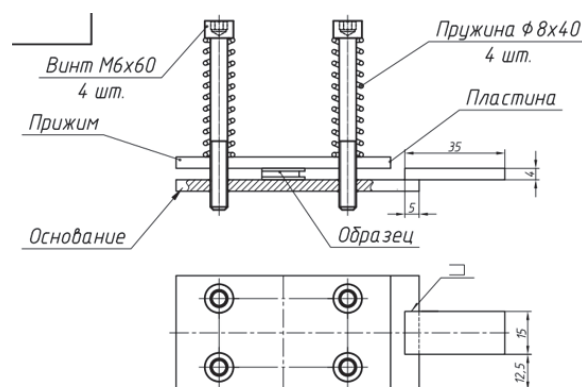


Рис. 1 Чертёж прибора

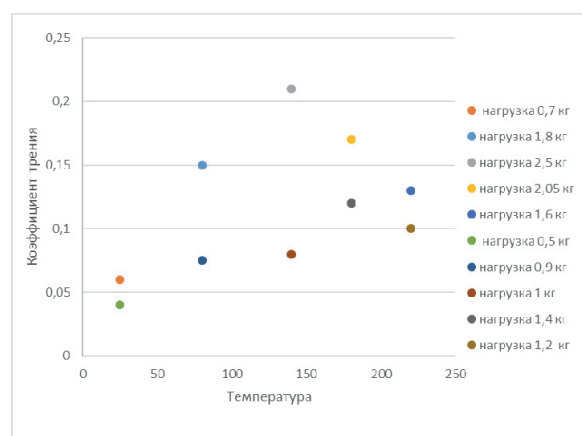


Рис. 2 температурная зависимость коэффициента трения сшитого полиэтилена

Трёхкомпонентные системы (композиция на основе фторированных эфиров) специальные продукты и технологии «Русь»

Двухкомпонентные системы фирмы Whitford (композиция на основе фторопласта-4)

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДА 6

Н.А. Марусенко¹, С.П. Богданович¹, Ю. Се²¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; Sennatar@mail.ru²ООО «Компания новых материалов Кэхуасэбан», ул. Цзиншидунлу, 16888, 250220, г. Цзинань, КНР

Введение. Одним из перспективных направлений исследований современного полимерного материаловедения является создание композитов для 3D-печати. В тоже время, наполнение полимерных матриц приводит к изменению не только их эксплуатационных, но и технологических свойств, что может существенно ограничить использование получаемых композитов в 3D-печати.

Цель работы. Оценка эффективности предварительной ультразвуковой обработки частиц технического углерода для улучшения важнейших эксплуатационных свойств композитов на основе ПА 6.

Материалы и методы исследований. В качестве полимерной матрицы использовали ПА 6, а в качестве модификаторов технический углерод (ТУ) марок N 347, C 140. ТУ использовали как без, так и с обработкой ультразвуком (УЗ).

Композиты получали экструзионным компаундированием, а образцы — литьем под давлением.

По действующим стандартам определяли следующие показатели свойств: модуль упругости (E_p) и предел текучести (σ_{pt}) при растяжении, максимальное удлинение при разрыве (ϵ_{pp}), ударную вязкость по Шарпи без надреза (a), объемное (ρ_v) и поверхностное (ρ_s) электрические сопротивления.

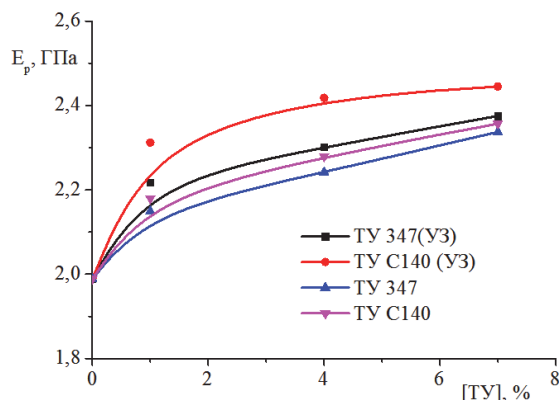
Результаты и их обсуждение.

Установлено, что ТУ ведет себя как упрочняющий модификатор: E_p ПА6 возрастает с увеличением доли наполнителя, достигая $\approx 23\%$ при использовании ТУ после обработки УЗ, а без нее — $\approx 19\%$. Причем в обоих случаях при использовании ТУ C 140 прирост выше, чем в случае ТУ N 347, рис. 1. Кроме того, наблюдается прирост σ_{pt} , достигающий для некоторых композиций $\approx 10\%$.

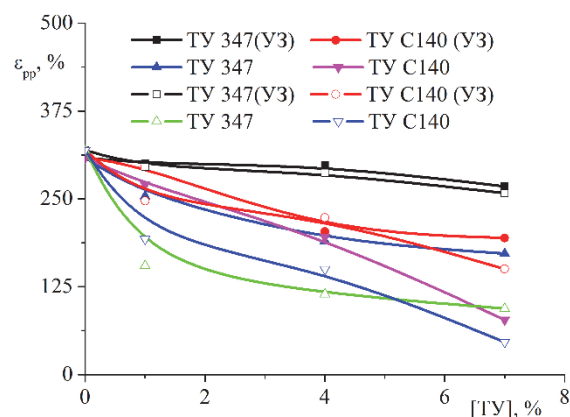
Одними из наиболее важных критериев применимости композита для 3D-печати представляются его относительное удлинение и ударная вязкость, которые могут помочь не только предварительно оценить технологичность материала, но и послужить основанием для прогнозирования хрупкости конечного изделия.

Выявлено, что при прочих равных условиях УЗ обработка ТУ существенно повышает ϵ_{pp} композитов, рис. 2. Например, для композиции, содержащей 7 мас.% C140, обработка ТУ в УЗ дает прирост ϵ_{pp} в $\approx 2,5$ раза для образцов без спая, а в случае образцов со спаем эта разница возрастает до $\approx 3,2$ раза.

При содержании ТУ до 4 мас.% образцы практически из всех композитов не разбиваются без надреза.

Рис. 1. Зависимость E_p от концентрации [ТУ]

В тоже время, величина ударной вязкости материалов с максимальной концентрацией ТУ N347 и C140, с обработкой УЗ, в, соответственно, 1,6 и 1,3 раза выше, чем композитов с ТУ без нее.

Рис. 2. Зависимость ϵ_{pp} от [ТУ] (незаполненные маркеры — образцы со спаем)

Установлено, что все исследуемые материалы обладают высокими электроизолирующими свойствами: ρ_v и ρ_s превышают уровень, соответственно, 10^{14} Ом·см и 10^{14} Ом.

Таким образом, предварительная УЗ обработка ТУ весьма перспективна для получения композитов для 3D-печати на базе ПА6, позволяя добиться дополнительного прироста показателей механических свойств: E_p — до 23 % по сравнению с ненаполненным ПА6, ϵ_{pp} до 3,2 раз и a до 1,6 раза по сравнению с композитами с ТУ без обработки УЗ при сохранении их высоких изоляционных свойств.

ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОФИЛЬНО-ПОГОНАЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

К.В. Овчинников¹, С.Ф. Мельников¹, А.В. Шаповалов¹, Д.Л. Подобед², С.Н. Бобрышева³

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; ovchinnikov.kv71@gmail.com

²Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Гомель, Беларусь

³УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», Гомель, Беларусь

Введение. В настоящее время в зарубежных странах активно развивается промышленное производство термопластичных древесно-полимерных композитов (ДПК), используемых в строительной отрасли, мебельном производстве, автомобильной промышленности. Строительные материалы из ДПК (прежде всего террасная доска – декинг и огражденные системы) неуклонно вытесняют традиционные деревянные изделия данного назначения. Несмотря на высокое процентное содержание отходов древесины в композициях, данная продукция имеет высокую себестоимость.

Цель работы — разработка ДПК на основе вторичных термопластичных отходов, позволяющих снизить себестоимость производства и обеспечивающих получение качественных профильно-погонажных изделий.

Материалы и методы. В качестве полимерного связующего использовали полипропилен (ПП) и полиэтилен низкого давления (ПЭНД). Композиции наполняли древесной мукой (ДМ) и термопластичными отходами ДПК (ОДПК). ОДПК представляют собой обрезки древеснополимерного листа (с полиэфирным холстопршивным полотном на поверхности), который используется для отделки потолка тракторов «Беларус». ОДПК образуется при формировании технологического проема для люка трактора, при этом годовое количество таких отходов превышает 40 тонн. В измельченных ОДПК содержится ПП (46—47 мас.%), ДМ (48—50 мас.%) и полиэфирные волокна (3—5 мас.%), которые остаются после предварительного отделения холстопршивного полотна от основы листа перед измельчением последнего. В качестве технологических смазок использовали полиэтиленовый воск, стеараты цинка и кальция. Для снижения горючести изделий использовали комплексную добавку — смесь бентонитовой глины и полифосфата аммония.

Образцы для предварительных физико-механических испытаний изготавливали с использованием двухшнекового экструдера с диаметром шнеков 25 мм и соотношением $L/D = 35$. В ходе экструзии получали полимерную полосу, из которой вырезали образцы для определения ударной вязкости по Шарпи (ГОСТ 4647-2015), прочности при изгибе (ГОСТ 4648-2014), водопоглощения (ГОСТ 4650-2014).

Результаты и их обсуждение. При разработке составов ДПК руководствовались необходимостью достижения максимального наполнения ДПК отходами производства (ОДПК) при минимальных расходах полимерного связующего и технологических добавок, учитывая стоимость сырья на рынке. Были предложены базовые составы при следующем содержании компонентов (мас.%):

- полимерное связующее — 5,0—8,0;
- ДМ — 8,0—12,0;
- ОДПК — 60—90;
- технологические смазки — 1—3;
- комплексная добавка — 2—6.

В ходе отработки технологических режимов экструзии и проведения предварительных физико-механических испытаний лабораторных образцов установлено, что оптимальное наполнение композиций ОДПК и ДМ при минимальном количестве полимерного связующего составляет соответственно 80 и 8 мас.%.

На промышленном экструзионном оборудовании на базе разработанных составов получена опытная партия террасной доски и штакетника. Установлены физико-механические показатели изделий, испытания которых проведены в лабораторных условиях в соответствии с действующими стандартами (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические показатели изделий

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , не менее	5
2	Прочность при изгибе, МПа, не менее	30
3	Водопоглощение, %, не более	2

Заключение. Разработанные составы ДПК, высоконаполненные термопластичными отходами (ОДПК), позволяют снизить себестоимость производства и получать профильные изделия с требуемыми эксплуатационными свойствами (хорошие прочностные показатели, низкое водопоглощение). На базе разработанных составов возможно производство широкой номенклатуры других изделий — например, лаг и плитки для пола, поручней, формованных деталей из листовых материалов для автомобильной и автотракторной техники и другой продукции.

К ВЫБОРУ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОЛИДИСПЕРСНОГО БЕНТОНИТА ВО ВТОРИЧНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

Д.Л. Подобед¹, В.Н. Пасовец¹, К.В. Овчинников²

¹ Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Минск, Беларусь: F_Heart@mail.ru

² Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А.Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. Применительно к высокодисперсным частицам важным является равномерность их распределения в полимерной матрице. Это определяет стабильность прочностных свойств изделия. Размер частицы может влиять на агломерирование и концентрацию напряжений в композиционном материале при приложении механических нагрузок, являясь источником образования в материале дефектных областей [1].

Метод исследования. Для анализа прочностных характеристик материала и выявления на стадии проектирования мест, характеризующих дефектные области в композите, предпочтительно использовать численное моделирование, которое реализовано в программном продукте ANSYS. Для исследуемых композитов применялась конечно-элементная сетка из плоских треугольных элементов PLANE 42, содержащих шесть узлов. Ее реализация была проведена в работе [2]. Каждый узел имел две степени свободы. Разбивка модели на конечные элементы выполнена в полуавтоматическом режиме с использованием подпрограммы MeshTool пакета ANSYS 2020 R2.

При создании конечно-элементной сетки учитывали зависимость точности метода конечных элементов от правильного выбора типа и размера элементов. Более частую сетку использовали там, где ожидался большой градиент деформаций или напряжений. Более редкую сетку применяли в зонах с более постоянными деформациями или напряжениями и в областях, где не предполагаются подобные деформации. Применение данного элемента оказалось наиболее удобным для моделирования неравномерной сетки плоской модели [3], которая представляется приемлемой и для полимерной матрицы с минеральными частицами. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Результаты и обсуждение. Применение в полимерной матрице частиц бентонита с размером в пределах 5—10 мкм способствует формированию концентрационных напряжений на границе раздела фаз. Это обусловлено неравномерностью распределения частиц наполнителя в расплаве полимера и образовании в месте контакта частиц бентонита с полимером дефектных зон. Введение частиц с размером 50—150 мкм с предполагаемым равномерным их распределением в полимерной матрице характеризуется снижением внутренних напряжений и наличием минимального количества дефектных зон.

Экспериментальным путем установлено расчетное влияние размера исследуемых частиц на

прочность композитов. Проведенный анализ показал, что увеличение размера частиц более 200 мкм приводит к существенному снижению (на 20—45 %) предела прочности композита при растяжении, а увеличение разницы между размером наибольшей и наименьшей частицы в 2 раза и более способствует снижению предела прочности при растяжении материала более чем на 45 %.

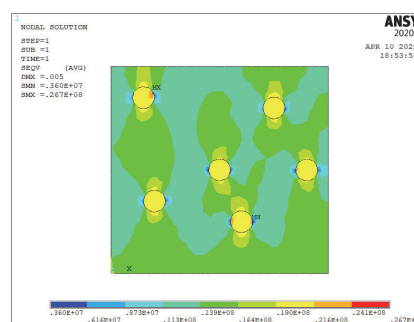


Рис. 1 – Поля распределения напряжений в мезофрагменте композиционного материала на основе системы «полимер-дисперсный наполнитель», Па

Заключение. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- оптимальный размер частиц полидисперсного бентонита для достижения равномерного распределения частиц по объему композита должен находиться в пределах 25,0—100,0 мкм;
- разницу между размером наибольшей и наименьшей частицы (разброс частиц) в полидисперсном наполнителе предпочтительно выдерживать в интервале от 100 до 200 %.

Для достижения вышеуказанных параметров наиболее эффективным представляется диспергирование частиц наполнителя с применением поверхностно-активных веществ.

1. Пасовец, В. Н. Упрочнение композиционных материалов на основе металлической матрицы и углеродных нанотрубок / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2019. – Т. 64. – № 2. – С. 166–174.
2. Алтынбаев, А. А. Метод конечных элементов программного комплекса ANSYS / А. А. Алтынбаев, К. К. Манабаев // Молодежь и современные информационные технологии : Сб. трудов XII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12–14 ноября 2014 года / Нац. исслед. Томский политехнич. ун-т. – Томск: Нац. исслед. Томский политехнич. ун-т, 2014. – С. 254–255.
3. Мансурова, А. Р. Применение программного комплекса ANSYS в компьютерном моделировании / А. Р. Мансурова // Молодой ученый. – 2018. – № 39(225). – С. 31–33.

ИССЛЕДОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.В. Прожега¹, Е.О. Решиков¹, Е.О. Константинов^{1,2}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²НИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Введение. Высокую эффективность проявляют твердые смазочные покрытия на основе дисульфида молибдена с различными связующими. Они обладают хорошими смазывающими и защитными функциями, снижают износ, повышают надежность работы и ресурс узлов и механизмов [1,2].

Твердосмазочное покрытие представляет собой жидкое вещество, образующее после нанесения сухой антифрикционный слой толщиной 20 ± 5 мкм.

Цель настоящей работы — определение коэффициента трения антифрикционных покрытий дисульфида молибдена в экстремальных условиях.

Материалы и методы. В данной работе исследованы шесть образцов покрытий на основе дисульфида молибдена и политетрафторэтилена, которые известны под следующими торговыми марками: покрытие А — ВНИИ НП 212; покрытие В — MODENGY 1053; покрытие С — MODENGY 1014; покрытие F — MODENGY 1002; покрытие Н — MODENGY 1005; покрытие К — MODENGY 1006 [3]. Представленные варианты покрытий отличаются составом, включая тип связующего вещества, уровнем триботехнических и антикоррозионных свойств, а также типом отверждения — холодное или горячее.

Технология нанесения покрытия включает в себя следующие этапы:

- Микроспектроструйная обработка, очистка и активация поверхности.
- Нанесение покрытия методом распыления.
- Отверждение поверхности.



Рис. 1. Трибологический вакуумный стенд «ВС-01»

Для проведения опытов использовали трибологический вакуумный стенд «ВС-01» [4].

Испытания по определению коэффициента тре-

ния проведены в вакууме при давлении менее 10^{-4} Па и при температуре 250 °С.

Трибологические испытания проводили в соответствии со стандартом ASTM G133 — испытания на износ в системе с возвратно-поступательным движением с помощью линейного механизма шар-плоскости. Материал шарика диаметром 6 мм — сталь 100Cr6.

Стенд оснащен аналого-цифровым преобразователем, вакуумметром, тензорезистором для измерения силы трения и термопарой.

Результаты и обсуждение. В ходе проведения эксперимента были получены значения коэффициента трения для каждого из образцов, которые представлены ниже (рис. 2).

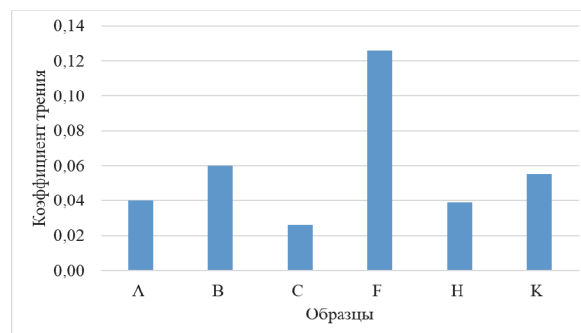


Рис. 2. Средние значения коэффициента трения в вакууме при температуре 250 °С

Результаты исследования в вакууме при давлении менее 10^{-4} Па и при температуре 250 °С показали, что покрытие образца С имеет наименьший коэффициент трения равный 0,026.

Коэффициент трения покрытия образца F равен 0,126, значение которого более чем в 2 раза превышает значения коэффициентов трения покрытий остальных образцов. Коэффициенты трения покрытий образцов А, В, Н и К равны 0,040, 0,060, 0,039 и 0,055 соответственно.

1. Wang, H., Xu, B., Liu, J. (2012). Solid Lubrication Materials. In: Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23102-5_1
2. Гаврилов К.В., Морозов А.В., Селезнев М.В., Рождественский Ю.В., Хозенюк Н.А., Дойкин А.А., Худяков В.С. Трение и износ. 2020. Т. 41. № 5. С. 647–654.
3. Modengy. Modengy — покрытия для снижения трения: [сайт]. URL: <https://modengy.ru/about/> (дата обращения 19.05.2022).
4. Прожега М.В., Решиков Е.О., Ширшов А.Д., Яковенко Н.Г. Фрикционные свойства полимеров для 3D-печати при трении в вакууме // Трение и износ. — 2020 (41), № 6, 760–767.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ

В.П. Селькин, О.С. Стерехов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», Гомель, Беларусь; selkin_v@mail.ru

Цель. Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), которые также называют графеновыми нанотрубками, поскольку они представляют собой свернутые в цилиндр плоскости графена, известны уже давно. Однако практическое применение они получили совсем недавно после 2014 г., когда компания OCSiAl начала их промышленное производство под брендом Tuball [1]. В 2021 г. введен действующий в России и Беларуси межгосударственный стандарт на ОУНТ [2]. Производство ОУНТ Tuball организовано в Новосибирске и Люксембурге. Tuball представляют собой нанотрубки диаметр которых находится в пределах 2 нм, а длина может достигать нескольких мкм (рис. 1). Благодаря такому высокому отношению длины к диаметру и исключительным электропроводящим свойствам их начали успешно применять при производстве источников тока и антистатических материалов. В тоже время существует проблема равномерного распределения и предотвращения агломерации ОУНТ в процессе введения в материал. Целью настоящей работы было изучение возможности использования ОУНТ для получения токопроводящих фторсодержащих композитов, предназначенных для использования в контакте с химически агрессивными средами и жидкостями.

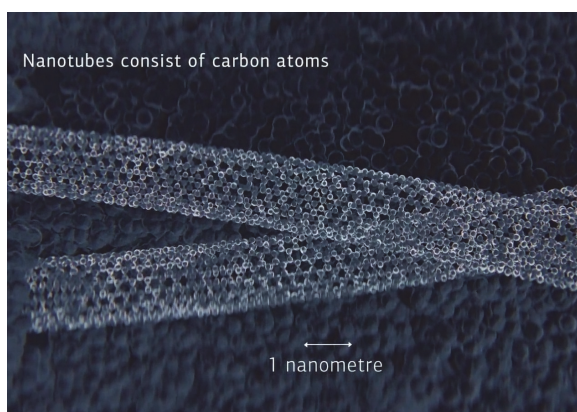


Рис. 1. Углеродные одностенные нанотрубки Tuball

Методика и материалы. Для введения в полимерную матрицу ОУНТ использовали предоставленный компанией OCSiAl тестовый концентрат Matrix 809, представляющий собой деагломерированные в полиэтиленовом воске трубки Tuball. В качестве фторсодержащего полимера был выбран выпускаемый АО «ГалоПолимер» плавкий сополимер тетрафторэтилена с этиленом (ЭТФЭ) — фторопласт-40 марки П по ТУ 301-05-17-89. Введение

ОУНТ осуществляли механическим смешиванием ЭТФЭ с концентратом Matrix и последующим пресованием смеси при температуре 290—300 °С и давлении 20 МПа. Удельное объемное электрическое сопротивление образцов измеряли по ГОСТ 6433.2-71 с помощью тераомметра Е6-13А.

Результаты исследований. Результаты исследования представлены на рис. 2. Показано, что введение в ЭТФЭ трубок Tuball в концентрации 0,2 мас.% обеспечивает достижения материалом антистатических свойств (удельное объемное электрическое сопротивление не более 10^8 Ом·м), а наполнение ЭТФЭ до содержания ОУНТ более 0,5 мас.% получить токопроводящий композит (удельное объемное электрическое сопротивление менее 10^5 Ом·м). При этом механические характеристики ЭТФЭ изменяются не значительно и материал сохраняет свою эластичность.

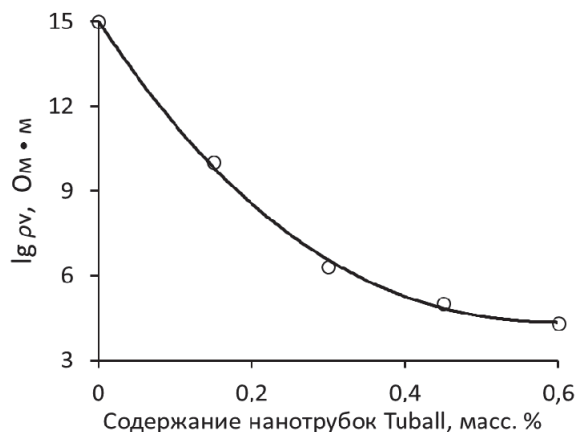


Рис. 2. Зависимость удельного объемного электрического сопротивления ЭТФЭ от концентрации введенных в него ОУНТ Tuball

Выводы. Установлена возможность получения с использованием ОУНТ токопроводящих композитов на основе фторсодержащих полимеров, которые можно использовать по различному назначению в химически агрессивных средах. Например, в случае применения композита на основе ЭТФЭ для изготовления искробезопасных топливных шлангов для авиационной и специальной техники.

1. Brochure Tuball Rus 200209.pdf. [Электронный ресурс]. https://ocsial.com/media/file/2020/06/22/BROCHURE_TUBALL_RUS_200209.pdf (дата обращения: 15.05.2022).
2. ГОСТ 34684-2020 Наноматериалы. Нанотрубки углеродные одностенные. Технические требования и методы испытаний.

ВЛИЯНИЕ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ НА ФРИКЦИОННО-ИЗНОСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ И ШУМООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ТРЕНИИ

В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.В. Кожушко, В.К. Меринов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; sbuharov@mpri.org.by

Введение. Накопленный к настоящему времени опыт эксплуатации электромобилей показал существенные отличия в работе тормозной системы электромобилей от автомобилей с ДВС. В первую очередь отмечается усугубление зависимости эксплуатационных свойств тормозной системы от стиля вождения. Так в случае «агрессивного» характера езды происходит более интенсивный износ фрикционных пар из-за того, что электромобили, постоянно снаряженные массивной батареей, являются, как правило, более тяжелыми, чем автомобили с ДВС. Другая типичная ситуация имеет место при спокойном стиле вождения, когда преимущественно используется рекуперативное торможение. В этом случае механическая тормозная система может фактически не использоваться в течение нескольких недель. Это приводит к значительной коррозии и необходимости более частых ревизий и ремонтов тормозной системы. Кроме того, образующиеся в результате коррозии частицы Fe_2O_3 влияют на шумовую характеристику тормозов [1].

Для решения данной практически важной задачи предлагается введение комплексных ингибиторов коррозии в составы полимерных фрикционных композитов. Наличие ингибиторов в зоне фрикционного контакта снижает скорость коррозии пары трения и вероятность появления шума тормозной системы.

Цель работы — исследование влияния ингибиторов коррозии, вводимых в состав полимерного фрикционного композита на фрикционно-износные и шумовые характеристики пар трения.

Материалы и методы. В качестве контртела использовали сталь 45 в виде дисков диаметром 30 мм с шероховатостью $R_a = 3,2$ мкм. Составы фрикционных композитов содержали 1,5 и 3 мас.% ингибитора коррозии порошкового типа. Для формирования плёнок переноса диски прошли фрикционные испытания в течение 150 мин. по схеме «плоскость-плоскость» при давлении 1 МПа. Линейная скорость на периферии диска составляла 0,8 м/с. Затем контртелу подвергались климатическим воздействиям в течение 4-х сут. по следующему циклу: нагрев до 55 °С и выдержка 16 ч, охлаждение до 20 °С и выдержка 8 ч. Влажность составляла от 95% до 100%. После сушки контртелу выполнены испытания с использованием системы анализа трибоакустических характеристик фрикционных материалов и смазок MFT-5000 (Rtec Instruments) по кинематической схеме трения «плоскость—плоскость»

при линейном возвратно-поступательном (циклическом) скольжении без смазочного материала.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов износных испытаний показал, что коррозия поверхности металлического контртела приводит к росту скорости изнашивания с 0,018 мм/ч до 0,06 мм/ч (приблизительно в 3,3 раза). Введение ингибитора в составы фрикционных композитов в концентрации 1,5 и 3 мас.% обеспечивает снижение скорости изнашивания пары трения до 0,04 и 0,05 мм/ч, соответственно. Результаты акустических измерений для полосы частот от 50 Гц до 25 кГц представлены на рис. 1. Пара трения с исходным (без коррозии и плёнок переноса) стальным контртелом демонстрирует максимальный уровень шума, превышающий 55 дБ в измеряемой полосе с локальным максимумом на 9,3 кГц. Для контртел с плёнками переноса, содержащими ингибиторы, уровень шума снижается. Минимальный уровень шума отмечается для образца содержащего 3 мас.% ингибитора.

Таким образом, проведенные трибоакустические исследования показали, что введение ингибитора коррозии в состав полимерного композита позволяет снизить скорость изнашивания и шумообразование в парах трения со стальным контртелом.

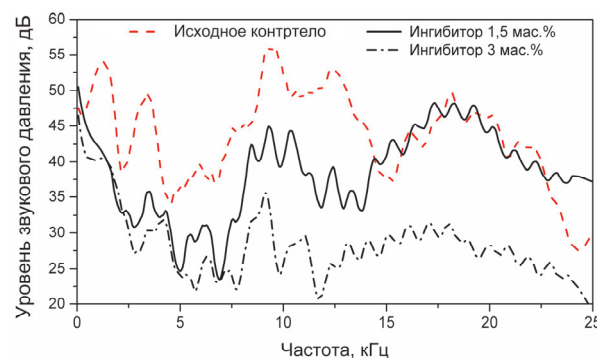


Рис. 1. Шумовые спектры, полученные в процессе фрикционно-износных испытаний

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ по программе «Наука электротранспорту» договор №Т21ЭТ-015.

1. Noh H. J. and Jang H. Friction instability induced by iron and iron oxides on friction material surface // Wear. – 2018 (400–401), 93–99.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ СОПОЛИМЕРА МЕТИЛМЕТАКРИЛАТ-АКРИЛОНИТРИЛ-БУТАДИЕН-СТИРОЛА

В.А. Стратанович, А.С. Брундуков, С.Ф. Жандаров, В.М. Макаренко

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vitalystratanovich.mpri@gmail.com

Введение. Курс на совершенствование существующих и создание новых материалов различного назначения обуславливает огромное разнообразие методов их поверхностной обработки, т.к. эксплуатационные показатели материала зачастую определяются именно свойствами его поверхности.

Модификация в низкотемпературной плазме является современным и эффективным инструментом регулирования свойств материалов, что обеспечивает столь широкое его применение.

В частности, плазмохимические процессы используются для изменения ряда физико-химических свойств поверхности, включая химическую структуру и состав, величину ее свободной энергии, морфологию и зарядовые свойства, с сохранением неизменных свойства материала в объеме. На практике это находит успешное применение в качестве активационной обработки полимерных поверхностей.

Цель работы: изучить влияние плазмохимической обработки (ПХО) на поверхностную энергию метилметакрилат-акрилонитрил-бутадиен-стирола (МАНБС).

Материалы и методы. В рамках экспериментального материала была выбрана лента МАНБС производства ИММС НАН Беларуси толщиной 0,3...0,5 мм. ПХО проводилась в среде остаточных газов на опытно-промышленной установке [1]. Давление остаточных газов, $P_{ост}$, составляло 10 и 20 Па, напряжение на генераторе, $U_{ген}$, 120 и 160 В, время обработки, $t_{обр}$, 10 и 60 с.

Измерение дисперсионных и полярных компонент поверхностной энергии проводили расчетным методом, основываясь на измерении краевых углов смачивания поверхности образцов по методике OWRK двумя различными жидкостями: глицерином и дистиллированной водой одинакового фиксированного объема (5 мкл) [2]. Оценку краевых углов смачивания указанных жидкостей проводили с помощью программного комплекса «ImageJ» с подключенным специализированным плагин. Составление матрицы эксперимента производилось с помощью программного комплекса «Experiment23». Оценку физических свойств материала проводили на приборе «ИПМ-1К».

Результаты и их обсуждение. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об увеличении поверхностной энергии более чем в

2 раза при ее ПХО. Данный эффект можно объяснить воздействием заряженных частиц, электромагнитного излучения, локальным разогревом, изменением морфологии поверхности и прививки функциональных групп [3].

Уравнение регрессии, полученное в ходе проведения трехфакторного эксперимента, дает возможность оценить влияние технологических факторов ($P_{ост}$, $U_{ген}$, $t_{обр}$) на показатель поверхностной энергии. Уравнение принимает вид:

$$y = 41,565 + 3,32 x_1 + 2,295 x_2 - 0,35 x_3 + 4,625 x_1 x_2 - 2,675 x_1 x_3 + 0,84 x_2 x_3 + 5,00 E^{-2} x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

Отсюда можно заключить, что наибольшее влияние на поверхностную энергию при ПХО оказывают давление остаточных газов, $P_{ост}$ (x_1) и напряжение на генераторе, $U_{ген}$ (x_2), в то время как время обработки $t_{обр}$ (x_3) влияет незначительно.

Исследование объемных свойств материала показывает, что ПХО не приводит к их изменению по сравнению с исходным материалом. Это свидетельствует об исключительно поверхностном характере обработки.

Заключение. Установлено, что при ПХО МАНБС в среде остаточных газов наибольшее влияние на процесс оказывают давление остаточных газов и напряжение на генераторе, при этом удается достичь улучшения поверхностной энергии более чем в 2 раза с сохранением объемных физических свойств на уровне исходного (не подвергнутого ПХО) материала.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Брелю Д. В. за содействие в проведении исследований.

1. Гракович, П. Н. и др. Установка для плазмохимической обработки углеродных тканей. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии // XVI Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ (13 – 17 сентября 2021 г., Иваново, Россия): сборник трудов / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2021. – 101 с.
2. Kwok, D. Y. Contact angle measurement and contact angle interpretation / D. Y. Kwok, A. W. Neumann // Advances in Colloid and Interface Science. – 1999. – No. 81. – P. 167–249.
3. Саркисов, О. А. и др. Морфологические, физико-химические особенности многократной обработки пленок полиэтилена в плазме барьерного разряда // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2021. – №. 1 (84). – С. 42–52.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УГЛЕ- И СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРЕКТОНА ПРИ ТРЕНИИ В ПРИСУТСТВИИ НЕЗАКРЕПЛЕННОГО АБРАЗИВА

В.А. Стратанович, А.С. Брундуков, А.В. Шаповалов, И.С. Шилько

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vitalystratanovich.mpri@gmail.com

Введение. Современные полимерные материалы и композиты на их основе, обладая низкой плотностью, высокой теплостойкостью и коррозионной стойкостью, хорошими триботехническими свойствами, высокой упругостью и ударной вязкостью позволяют добиться значительного увеличения абразивной устойчивости [1].

Среди современных материалов в качестве наиболее перспективных с точки зрения использования в трибосопряжениях, можно выделить класс термопластичных полимеров, а именно «инженерные пластики», в особенности полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и композиции на его основе.

Цель работы: установление закономерности изнашивания полиэфирэфиркетона дисперсно наполненного углеродными и стеклянными волокнами в присутствии незакрепленного абразива.

Материалы и методы. В качестве исследуемого материала был выбран ПЭЭК, наполненный стеклянным (СВ) и углеродным (УВ) волокном. Концентрация наполнителя составляла 30 мас. %.

Испытания на износ незакрепленными абразивными частицами проводились на дисковой машине трения торцевого типа ЛКИ-3. В зону трения, представляющую собой диск, выполненный из стали с шероховатостью $R_a 1,25$, подавался песок с размерами зерна менее 0,5 мм. Давления в зоне контакта P_k принимались в диапазоне в диапазоне 5—55 кПа. Линейная скорость при трении в рамках всей серии экспериментов сохранялась неизменной и составляла 0,33 м/с. Путь трения L составлял 197 м, время каждого испытания составляло 10 минут,

и контртела A_a определяли линейную интенсивность изнашивания по формуле (1) [2].

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho A_a L} \quad (1)$$

Результаты и их обсуждение. Анализируя экспериментально полученные данные, можно сделать вывод о том, что увеличение нагрузок в зоне трения, а, следовательно и контактных давлений P_k приводит к увеличению интенсивности изнашивания I_h . Данная зависимость характерна для композиционных материалов, наполненных как стеклянным, так и углеродным волокном и может быть объяснена увеличением глубины внедрения абразивных частиц в объем композиционного материала с увеличением контактного давления. Абразивная частица, закрепившаяся в процессе трибозаимодействия с материалом, осуществляет микрорезание. При этом, она способна проворачиваться в приповерхностных слоях материала что может оказывать повторяющееся режущее воздействие на последний.

Сравнительный анализ профиля поверхностей исходных материалов и поверхностей трения подтверждают данное положение.

Заключение. С увеличением контактного давления интенсивность изнашивания рассматриваемых ПЭЭК композитов возрастает. Абразивные частицы, при увеличении давления в зоне контакта, внедряются на большую глубину в объем полимерного образца, что приводит к интенсификации процессов отделения поверхностных слоев материала в процессе перемещения.

Установлено, что износостойкость стеклонаполненного композита оказалась более чем в 3 раза выше чем для угленаполненного материала при давлении в зоне контакта 10—55 кПа.

Благодарности. Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору кафедры «ТТМиО» Богдановичу П.Н. за содействие в проведении исследований.

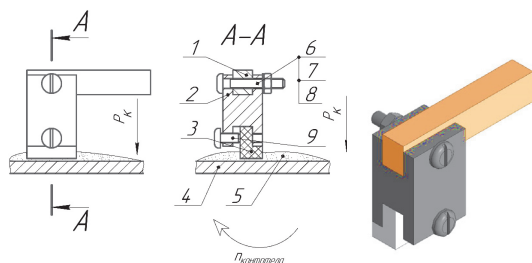


Рис. 1 — Общий вид узла крепления образцов: 1 — планка; 2 — держатель образцов; 3 — образец; 4 — стальное контртело; 5 — абразивная масса; 6, 7, 8, 9 — крепежные изделия

Используя данные о потере массы Δm , плотности материалов ρ , а также площади контакта образца

1. Прушак, В.Я. Научные основы повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей горных машин: дис. д-ра техн. наук: 05.05. 06. – 2000.
2. Богданович, П.Н. Трение, смазка и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011 – 527 с.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПОЛИУРЕТАНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

А.А. Тимофеев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; timoshenko13@gmail.com

Введение. Вторичная переработка отходов полиуретанов является актуальной задачей, так как позволяет не только сократить загрязнение окружающей среды, но и увеличить коэффициент использования дорогостоящих и не производимых в Беларуси сырьевых ресурсов.

Цель работы – исследование полимерных композиций на основе отходов полиуретана, полученных путем целевого модифицирования полимерной матрицы, с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

Материалы и методы.

В качестве основного компонента композитов использовали вторичное полимерное сырье в виде отходов ПУ обувных предприятий – смесь пенополиуретана и термопластичного ПУ (вт. ПУ). С целью повышения технологичности переработки композиций применяли следующие ингредиенты: масло вазелиновое (ГОСТ 3164) и стеарат цинка (ТУ 2432-011-10269039-2013) в количестве 0,25—1,0 мас.%. В качестве наполнителей использовали: аэросил А-380 (ГОСТ 14922), отходы коврового производства (кноп стригальный полипропиленовый с длиной волокон 2—4 мм), отходы деревообработки (древесная мука (ДМ), с размером частиц 8—78 мкм) в количестве 0,1—5,0 мас.%.

Композиционные материалы исследовали по следующим показателям: плотность (ГОСТ 267), твердость по Шору А (ГОСТ 263), абразивный износ на машине «APG-300» (ГОСТ 11012). Разрушающее напряжение при растяжении, относительное и модуль упругости определяли по ГОСТ 11262 на исследовательском комплексе «Instron 5657» («Instron», Великобритания).

Результаты и их обсуждение.

Предварительно проведенные исследования показали, что введение во вт. ПУ целевых технологических добавок в виде вазелинового масла и стеарата цинка способствует улучшению его перерабатываемости. На основе базовой композиции «вт. ПУ + технологическая добавка» были получены композиты с различным содержанием дисперсных наполнителей, исследованы показатели их физико-механических свойств.

Введение ультрадисперсных частиц аэросила в базовую композицию «вт. ПУ + масло вазелиновое

+ стеарат цинка» позволяет повысить прочностные характеристики на 18—27%, твердость — на 5—8%, а также снизить абразивный износ образца в 2 раза по сравнению с исходным вт. ПУ. В то же время наблюдается снижение величины относительного удлинения при разрыве на 17—30%. Оптимальное содержание аэросила в композиции находится в пределах 0,2—0,5 мас.%. Улучшение физико-механических свойств композиции во многом определяется равномерным распределением частиц аэросила в объеме материала. Его увеличение более 0,5 мас.% приводит к снижению показателя прочности и твердости материала.

Установлено, что при введении в композицию добавки «кноп стригальный» характерно отсутствие стабильности физико-механических характеристик, в особенности, при содержании кнопа в пределах 0,5—1,0 мас.%. Это связано, по-видимому, с низкой совместимостью данного типа полимерного волокна с расплавом вт. ПУ, что обуславливает неоднородность структуры композиции.

ДМ можно рассматривать как недорогой наполнитель, который может помочь снизить содержание в композиции полимерного связующего, а при определенной концентрации повысить жесткость и износостойкость изделий. Установлено, что введение ДМ во вт. ПУ в концентрациях 1 мас.% и 5 мас.% позволяет сохранить прочностные свойства композиции на уровне исходного вт. ПУ. Волокнистая структура частиц древесины в некоторых оптимальных концентрациях этого наполнителя позволяет реализовать возможность формирования упорядоченной структуры композиционного материала. Необходимым условием для обеспечения данного эффекта является достижение в процессе переработки оптимальной технологической совместимости древесных частиц с полимерной матрицей.

Таким образом, использование комбинации целевых модифицирующих добавок с индивидуальным эффектом, реализуемым каждой из них, позволяет для отечественных обувных производств сохранить и улучшить уровень качества готовых изделий на основе вт. ПУ, обеспечить рециклинг отходов ПУ, снизить себестоимость конечной продукции, улучшить экологическую составляющую и расширить ассортимент полимерных композиционных материалов.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Е.М. Толстомятов, В.А. Шелестова, В.М. Макаренко

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Плазменные процессы в среде фторуглеродов широко используются, в первую очередь, в технологиях микроэлектроники. Новое направление плазменной полимеризации фторсоединений — для обработки компонентов композиционных материалов, обеспечивающей улучшение совместимости их с полимерной матрицей, в основном с политетрафторэтиленом [1, 2].

Взаимосвязь основных технологических и физико-химических характеристик плазменного процесса и свойств обработанной поверхности многогранна. Отсутствие в литературе однозначных непротиворечивых выводов, действительных для любых условий обработки, свидетельствует о сложности плазмоиндуцированных процессов во фторуглеродах и неполном учёте всех существенных факторов влияния. По этой причине пока ещё отсутствует общая теория таких процессов, предложены лишь частные модели, описывающие лишь отдельные группы экспериментов.

Цель работы — изучение взаимосвязи характеристик плазменного процесса в среде газообразного фторсоединения с эффективностью осаждения фторполимерного покрытия.

Материалы и методы.

Эксперименты проводились на вакуумной установке для плазмохимической обработки (ПХО) углеволокон. Использовалась разрядная система с емкостной связью без подачи внешнего напряжения смещения. Дозирующим устройством СНА-2 устанавливалась рабочая скорость подачи рабочего газа.

В качестве основного исходного вещества для плазмохимического синтеза покрытий выбран хладон С318 — октафторциклобутан (ОФЦБ) C_4F_8 . Это нетоксичный негорючий озонобезопасный газ. Объектом ПХО являлись образцы углеродной ткани марки Т-1-15Н/600.

Для контроля осаждения покрытий применяли метод микровесов на основе кварцевого резонатора типа АТ. Использовали открытый кварцевый резонатор, расположенный над углетканью, который в таком виде является массочувствительным сенсором, так как его собственная частота колебания зависит от массы сорбированного на его поверхности вещества. Выводы резонатора изолированы, перед измерением частоты выдержка составляла 1 мин. Скорость роста покрытия, определенная в относительных единицах, пропорциональна скорости изменения частоты кварцевого резонатора.

Результаты и обсуждение.

На рисунке представлены результаты измере-

ния сдвига частоты кварцевого резонатора, помещенного в камеру ПХО, от времени обработки в среде ОФЦБ при импульсном режиме генератора (период — 25 мкс, амплитуда — 1000 В).

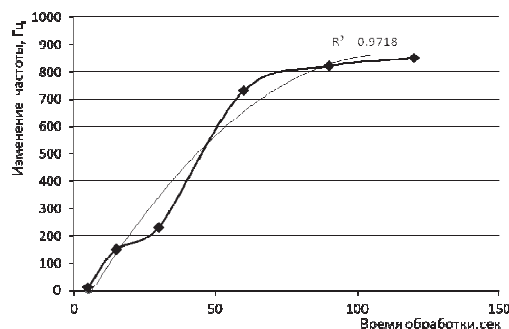


Рис. 1. Зависимость сдвига частоты кварцевого резонатора от времени обработки в среде ОФЦБ.

Нелинейность скорости осаждения покрытия по времени можно объяснить тем, что начальный период представляет собой этап образования зародышей на поверхности и роста островкового покрытия, который характеризуется наличием барьера. При образовании сплошного покрытия барьер снижается либо исчезает полностью, поскольку центрами роста являются свободные радикалы, плотно расположенные на всей поверхности. Таким образом, можно считать, что выход графика на режим, близкий к насыщению, соответствует образованию сплошного покрытия на поверхности датчика. Это соответствует времени обработки 70...80 с при использованных режимах потока газа и электрических параметрах разряда.

Проведены эксперименты по обработке углеродной ленты в разряде, в котором импульсы следовали пакетами с разными коэффициентами заполнения. Изменяли длительность пакета импульсов и длительность паузы между пакетами импульсов так, чтобы получить различные коэффициенты заполнения импульсами (от 6% до 100%).

Установлено, что сдвиг частоты кварцевого резонатора пропорционален одновременно коэффициенту заполнения импульсами и времени обработки, т.е., фактически, скорость нанесения фторорганического покрытия пропорциональна энергии, подведенной в камеру ПХО.

1. Патент РБ № 22089, МПК С 08J 5/06. // Официальный бюллетень. — 2018. - №4. — С. 87.
2. V. A. Shelestova, P. N. Grakovich and S. F. Zhandarov. A Fluoropolymer Coating on Carbon Fibers Improving Their Adhesive Interaction with PTFE Matrix // Composite Interfaces, 2011. Vol. 18, p. 419-44.

ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА НА МИНИМАЛЬНОЕ РАЗРУШАЮЩЕЕ ДАВЛЕНИЕ В ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБКАХ

В.Н. Усова, С.А. Герасименко

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; viktoriya.usovav@mail.ru

Введение

Топливная система (ТС) – комплекс агрегатов и узлов, обеспечивающая хранение и подачу топлива в двигатель внутреннего сгорания. Топливные полимерные трубки являются важной составляющей ТС и устанавливаются как на днище кузова автомобиля, где подвержены прямому воздействию окружающей среды так и в моторном отсеке, где возможны контакты с техническими жидкостями, применяемыми в автомобиле и моющими средствами при обслуживании автомобиля. По трубкам от топливного бака к двигателю автомобиля подается автомобильный бензин любой марки, в том числе со спиртовыми добавками и окисленного бензина, а также дизельное топливо [1]. Представляло научный и практический интерес проанализировать длительное воздействие топлива на прочностные характеристики полимерных трубок.

Цель работы – анализ влияния продолжительности выдержки полимерных труб в различных видах топлива на минимальное разрушающее давление.

Используемые материалы и методика испытаний

Для оценки воздействия различных видов топлива на минимальное разрушающее давление использовались полимерные трубки на основе модифицированного полиамида (ПА). Трубки выдерживались в бензине и дизельном топливе при комнатной температуре в течении 1 и 2 недель, после чего были испытаны на гидравлическом стенде, обеспечивающем рабочее давление не менее 10 МПа (100 кгс/см²).

Перед проведением испытаний один конец трубки подсоединяли к источнику давления, заполняли испытательной жидкостью до полного удаления воздуха через клапан прокачки. Затем плавно и бесступенчато повышали давление, фиксируя по манометру его значение в момент разрушения образца. Под разрушением образца подразумевается нарушение его целостности, сопровождающееся резким снижением показания давления на контрольном манометре при продолжающейся подаче испытательной жидкости.

Исследование изменений температуры, теплоты плавления и кристаллизации; степени упорядоченности структуры в образце проводили с помощью дифференциально сканирующего калориметра DSC 214 Polyma (Netzsch-Gerätebau GmbH, Германия.) Масса навески — 6 мг, скорость нагрева в сре-

де азота — 10 °С / мин.

Результаты и их обсуждение

Прочностные характеристики трубок являются важным параметром, влияющим на безопасность эксплуатации автомобиля, в связи с этим были проведены испытания по определению минимального разрушающего давления в них. Результаты экспериментов приведены по средним значениям в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость минимального разрушающего давления от времени выдержки в бензине/дизельном топливе

Название исследуемого образца	Минимальное разрушающее давление, МПа	
	Бензин	Дизельное топливо
Полимерная трубка (ПТ) исходная	8,2	
ПТ выдержка 1 неделя	8,4	8,2
ПТ выдержка 2 недели	6,5	7,7

Из табл. 1 следует, что трубки, которые выдерживались в бензине/дизельном топливе 2 недели, имеют значения разрушающего давления на 7—21% ниже исходного. Также для них характерно побеление в местах нарушения целостности образца, что свидетельствует о повышении эластичности трубки.

Таблица 2. Зависимость температуры плавления ($T_{пл}$) ПА от времени выдержки в бензине/дизельном топливе

Название исследуемого образца	$T_{пл}$, °С	
	Бензин	Дизельное топливо
Полимерная трубка (ПТ) исходная	218,2	
ПТ выдержка 1 неделя	217,5	217,3
ПТ выдержка 2 недели	217,6	217,5

Анализ температур плавления полиамидной составляющей трубки, свидетельствует о незначительных структурных изменениях, исследуемых образцов под действием бензина и дизельного топлива. Исходная ПТ характеризуется интенсивным пиком плавления с максимумом при $T = 218,2$ °С. При выдержке ПТ характер термограммы не изменяется коренным образом: пик плавления незначительно смещается в низкотемпературную область.

1. Харитонов Е. А. Диагностика и основные причины неисправностей топливной системы // Наука без границ. – 2021 (56), №4, 89 – 92.

БАКТЕРИЦИДНЫЙ КРИОГЕЛЬЕ.А. Цветкова¹, И.Ю. Ухарцева², В.И. Сильвистрович³, Ж.В. Кадолич²¹ Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; tsvetkova21@mail.ru² Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь³ Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Введение. Одним из активно развивающихся направлений в биоматериаловедении является создание систем направленного действия на основе нанотехнологий. Особенности патогенеза ран различной этиологии обуславливают необходимость использования широкого спектра лекарственных средств при различной длительности лечения. Однако применение комплексов лекарственных средств не всегда дает положительный эффект, в частности, из-за их несовместимости в одном препарате, и может сопровождаться аллергическими реакциями.

Анализ опыта создания композиций подобного назначения, в том числе содержащих различные лекарственные средства и биополимеры, показал, что большинству из них присущи недостаточная стабильность консистенции; низкая резистентность содержащихся в них функциональных добавок по отношению к протеолитическим микроорганизмам, высокая стоимость сополимерных комплексов сложного химического состава и др.

Цель — разработка физиологически активной бактерицидной композиции, обладающей высокими сорбирующими свойствами и формоустойчивостью для лечения трофических ран и язв различной этиологии.

Материалы и методы. Выбор компонентов для получения экспериментальных образцов обусловлен критериями их биологической совместимости, отсутствием токсичности и гипоаллергенности.

Для контакта с кожным покровом использовали поливиниловый спирт (ПВС), хитозан, глицерин, настойку прополиса, аскорбиновую кислоту и пектин. Образцы композитов получали на основе криогелевых технологий [1, 2]. Для исследования структуры, формоустойчивости, сорбционных и электретных свойств композиций применяли стандартные физико-механические и физико-химические методы исследования.

Результаты и их обсуждение. По результатам анализа физико-механических характеристик образцов с различным соотношением компонентов установлено, что оптимальное содержание ПВС в композиции составляет 5—10 мас.%. Это позволяет достичь прочности в диапазоне 0,6—0,9 МПа. Содержание глицерина в композиции, удовлетворяющее ее формоустойчивости и медицинским требованиям, находится в диапазоне от 3 до 10 мас.%. Увеличение концентрации глицерина приводит к значительному повышению прочности композиции и его синергиз-

му, что сказывается на ухудшении эргономических свойств биоматериала. Оптимальное содержание хитозана экспериментально установлено в пределах 5,0 мас.%. Превышение этого значения ограничено технологическими параметрами: композиция становится вязкой, что затрудняет получение конечного продукта с оптимальными физико-механическими характеристиками, обеспечивающими моделирование любого профиля поверхности кожи человека. Предлагаемое содержание пектина от 6 до 10 мас.% достаточно для выполнения адгезионной и сорбционных функций, хотя возможно и повышение его до 20 мас.%, что не влияет на формоустойчивость композиции. Однако повышенное содержание пектина усиливает адгезию к коже, что сопряжено с болевыми ощущениями и опасностью травмирования раневой поверхности при снятии покрытия с кожи. Присутствие в гелевой системе биологически активных соединений практически не оказывает влияния на физико-механические характеристики, а их концентрация определяется только их медицинскими показаниями, влиянием на бактерицидность и ольфакторное восприятие.

Разработанный композиционный криогель обладает сравнительно высоким ($\epsilon = 3,0$) значением диэлектрической проницаемости, благодаря чему способен сохранять электретный заряд по времени. Электретное состояние, реализуемое в композиционном материале, способствует управлению процессами сорбции и десорбции активных компонентов за счет возможности регулирования гидрофильно-гидрофобного баланса, способствует улучшению биосовместимости, а также в оптимальных биофизических условиях оказывает лечебный эффект посредством влияния на процессы ранозаживления за счет регулируемого воздействия поля электретного заряда.

Разработанные композиции бактерицидного криогеля могут найти применение в производстве изделий медицинской техники, в частности, средств лечения ран различной этиологии, ожогов, гнойно-трофических язв и абсцессов. Общий уровень свойств предлагаемых композиционных материалов удовлетворяет базовым требованиям, предъявляемым к раневым покрытиям.

1. Цветкова Е.А., Ухарцева И.Ю. Криогели поливинилового спирта как матрица для биоматериалов // Пластические массы — 2015, №11-12, 53—57.
2. Пат. 1555 ВУ. Способ изготовления криогеля поливинилового спирта: / П.И. Бондаренко, Л.С. Пинчук, Е.А. Цветкова, В.А. Гольдаде, А.М. Дворник. Опубл. 02.28.2012.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ И ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

В.М. Шаповалов¹, В.Д. Джафаров², А.А. Тимофеев¹, Д.Л. Подобед³, С.В. Зотов¹

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, zotov-1969@mail.ru

²Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, Сумгаит, Азербайджан

³Гомельский филиал Университета гражданской защиты, Гомель, Беларусь

Введение. Одним из перспективных направлений в области композиционного материаловедения представляется применение вторичных полимеров для получения технически ценных изделий. Важным при получении таких материалов является подбор функциональных добавок и наполнителей, влияющих на совместимость полимерных компонентов, стабильность структуры и эксплуатационных свойств формируемого композита. В связи с этим большое значение приобретает развитие методов физического модифицирования вторичных термопластов, что позволяет создавать материалы, во многом конкурирующие с композитами на основе первичных полимеров.

Цель работы состоит в обсуждении проблемы рециклинга вторичных полимеров с точки зрения разработки новых типов наполненных композитов.

Материалы и методы: патентно-информационный поиск, анализ статистической и рекламной информации.

Результаты и их обсуждение. Наиболее широко в качестве дисперсных минеральных наполнителей для полимеров используются природные и синтетические силикаты: кремнезем, кварц, каолин, слюда, тальк, асбест, стекло, нефелин и др. Однако возможности повышения свойств полимерных композитов путем введения традиционных наполнителей практически исчерпаны. Введение в состав дорогостоящих компонентов создает тенденцию к повышению стоимости композитов. Одним из перспективных путей является перевод наполнителя в ультрадисперсное состояние, когда размер частиц становится соизмеримым с радиусом действия сил межмолекулярного взаимодействия, а поверхностная энергия становится сравнимой с энергией когезии. Поэтому в материаловедении бурно развивается нанотехнологическое направление, позволяющее регулировать фазовый состав и структуру материала в пределах ультра- и наноразмерных диапазонов. На это направлены, в частности, совместные исследования ИММС НАН Беларуси с лабораторией вторичной переработки и экологии полимерных материалов института полимерных материалов НАН Азербайджана.

Установлено, что применительно к вторичным термопластам необходим учет их физико-химического состояния после переработки и хранения, а также стоимостной показатель. Поэтому

представляется целесообразным рассмотреть возможность применения дисперсных наполнителей, являющихся отходами производств и обладающих доступностью и невысокой стоимостью. К этому роду дисперсных частиц следует отнести: бентониты, отходы переработки стекла, отходы металлургического производства, отходы шлифовального производства, отходы химического производства (кремнегель) и др. При этом важно учитывать возможность их дальнейшего диспергирования в частицы ультрадисперсного размера и их аппретирование. В то же время проблемы, возникающие при получении наполненных композитов, связаны главным образом с трудностью равномерного распределения частиц наполнителя в объеме материала и их агломерированием, что влечет за собой образование обширных дефектных зон и отсутствие стабильности (равномерности) прочностных свойств, а, следовательно, невозможность применения таких материалов в ответственных узлах машин и механизмов вследствие снижения их надежности. Это еще раз подчеркивает важность совершенствования технологий смешения компонентов.

Особое место следует отвести композиционным системам с использованием смесей полиолефинов, где практически не изучены процессы структурообразования материалов в присутствии высокодисперсных частиц, закономерности их совместимости при экструзионной переработке, а также рецептурно-технологические особенности формирования изделий, где важное значение приобретает стабильность механических свойств, стойкость к агрессивным средам, адгезионное взаимодействие в системе полимер-наполнитель и структурная однородность материала. Это требует проведения систематизированных исследований.

Выводы. Развитие методов физического модифицирования вторичных полимеров в ходе их рециклинга будет обеспечивать создание композитов с низкой потребительской ценой и приемлемыми свойствами, а также способствовать решению проблемы охраны окружающей среды.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» (тема 4.2.2, НИР 2).

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.М. Шаповалов, А.Я. Григорьев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, v.shapovalov@tut.by

Введение. Одним из результатов антропогенной деятельности человека является образование отходов, среди которых отходы пластмасс занимают особое место. В связи с этим решение проблемы их утилизации, а также нивелирование вреда, приносимого здоровью людей и окружающей среде представляется актуальной и своевременной задачей.

Методы переработки, утилизации и обезвреживания полимерных материалов. При термообработке полимеров происходит выделение в атмосферу больших количеств углекислого газа, что приводит к парниковому эффекту в атмосфере. При сжигании образуются вредные летучие вещества, которые загрязняют воздух и, соответственно, воду и землю.

С помощью пиролиза можно получить целый ряд полезных продуктов, однако данный метод считается весьма энергозатратным и требует применения дорогостоящего оборудования. Существует также метод депонирования, который предполагает хранение полимерных отходов на полигонах, что представляется к явно нецелесообразным, так как большинство пластиков не разлагаются десятки лет, нанося огромный вред почве. Таким образом, традиционные способы утилизации отходов – депонирование и сжигание для полимеров неприемлемы.

В последние годы возникли новые подходы к получению «экологически чистых» полимеров и изделий из них, так называемая «зеленая технология». Речь идет о полимерах и материалах из них, способных более или менее быстро разлагаться в природных условиях. Заметим при этом, что все биологические полимеры, к числу которых относятся в первую очередь белки и полисахариды, в той или иной степени подвержены биоразрушению. Здесь соблюдается принцип: что создает природа, то она способна разрушить. Известны три типа разлагаемых полимерных материалов: фоторазлагаемые, биоразлагаемые, водорастворимые. Все они обладают достаточной стабильностью в обычных условиях эксплуатации и легко подвергаются разложению. Для их практического применения они должны удовлетворять следующим требованиям: при модификации не изменять эксплуатационные характеристи-

ки полимера; не быть токсичными; перерабатываться обычными методами; могли бы храниться и эксплуатироваться длительное время в условиях отсутствия прямого проникновения УФ-лучей. Одним из перспективных направлений в области зеленых технологий представляется «зеленая трибология». Зеленая трибология — это наука и технология трибологических аспектов экологического баланса и экологические и биологические воздействия. Целью и сутью исследований зеленой трибологии являются экономия ресурсов и энергии, защита окружающей среды и повышение качества жизни. Перспективным способом снижения загрязнения окружающей среды полимерами является вторичная переработка отслуживших свой срок полимеров и изделий из них. Наибольшие успехи в этом достигнуты при вторичном рециклинге крупнотоннажных изделий из каучуков и термопластов.

Заключение. Широкое внедрение полимерных материалов в различные области человеческой деятельности поставило перед специалистами-материаловедами ряд важных проблем, включая и проблему охраны окружающей среды. Важность решения экологических проблем обусловила жесткие требования к полимерам и технологиям их получения: производство полимеров должно быть экологически чистым или, по крайней мере, иметь минимальное влияние на окружающую среду; полимеры должны быть повторно перерабатываемыми или биodeградируемыми. Чтобы грамотно решать эти задачи, необходимо знать методы утилизации и обезвреживания полимерных материалов. Особенно большое значение в плане снижения количества отходов, их рационального использования, создания безотходных технологий, имеют процессы переработки вторичных полимерных материалов, которые напрямую связаны и с проблемой снижения дефицита первичных полимеров. При этом важно понимание того, что окружающая нас среда – земля, вода и воздух не обладают бесконечным иммунитетом против химической эксплуатации и мировое сообщество должно по-новому оценивать катастрофические последствия беспечного и неосторожного обращения с природой.

ВЛИЯНИЕ АНТИПИРИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТОЙКОСТЬ К ОКИСЛЕНИЮ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА

В.В. Шевченко¹, А.А. Давыдов¹, С.П. Богданович¹, Ф. Цай²

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; mpri.shevchenko@gmail.com

²Институт энергии Академии наук провинции Шаньдун, г. Цзинань, КНР

Введение. Термопластичные композиционные материалы, в частности термопластичные полиуретаны (ТПУ), широко используют для изготовления изделий электротехнического назначения и электроизоляционных покрытий. Для повышения стойкости к горению в композиты на стадии переработки вводят антипирирующие добавки (АП). В то же время, информация о влиянии АП на стойкость к окислению полимерной матрицы и механические свойства в широком диапазоне температур крайне ограничена.

Цель. Представляло интерес оценить влияние антипирирующих добавок на динамические механические свойства композитов и их стойкость к термоокислительной деструкции.

Материалы и методы. Матричным полимером являлся ТПУ Витур Т-0433-85 («Витур», Россия). В качестве АП использовали дициандиамида (ДЦДА) $C_2H_4N_4$ (КНР), меламин МА («Borealis AG», Австрия) и меламинцианурат МЦ FR-6120 («Bromine Compounds», Израиль), а стабилизатора термоокислительной деструкции – Ирганокс 1098 («BASF», ФРГ).

Получение композитов осуществляли экструзионным компаундированием по технологии, описанной в [1]. Экспериментальные образцы изготавливали литьем под давлением.

Для получения зависимостей механических и вязкоупругих свойств материалов от температуры использовали метод динамического механического анализа. Эксперименты проводили в режиме одноконсольного изгиба при частоте 10 Гц.

Время окислительной деструкции (изотермическое ВОИ) определяли на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) в соответствии с ГОСТ 56756-2015. За ВОИ принимали время, соответствующее максимуму экзотермического пика окисления, за нулевую точку — момент перехода на воздушный поток в режиме изотермы.

Результаты и их обсуждение. Добавки АП в ТПУ приводят к заметному росту динамического модуля сдвига G' (рис. 1) в диапазоне температур от -80 до $+70$ °С, что характеризует все используемые АП как наполнители, повышающие жесткость матрицы. Причем, чем выше концентрация АП, тем больше прирост G' , который достигает, например, для 15% МА — 1,3 раза, а для 30 % — 2,5 раза по сравнению с исходным ТПУ. Следует отметить, что наибольший рост G' наблюдается для области тем-

ператур выше 0 °С.

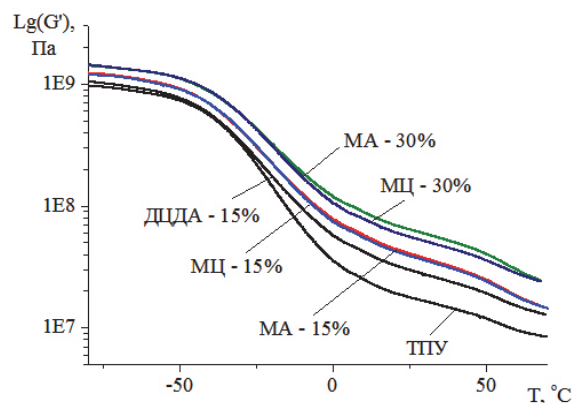


Рис. 1. Температурные зависимости G' композитов на базе ТПУ. Обозначения на кривых – АП и его содержание в ТПУ в мас. %

Установлено, что ни один из АП не приводит к заметному смещению температуры пика стеклования ($T_g \approx -13 \pm 1$ °С), что свидетельствует о сохранении эластичности ТПУ в области низких температур и об отсутствии сильного взаимодействия матрицы с наполнителем, способного сдвинуть T_g . Кроме того, все АП приводят к некоторому снижению площади пика стеклования, указывая на рост доли кристаллической фазы ТПУ.

По данным ДСК введение антипиринов приводит к снижению ВОИ по сравнению с немодифицированным ТПУ в среднем на 10 минут для композитов, содержащих МА и МЦ. Следует отметить, что при использовании ДЦДА провести определение ВОИ на установленных режимах не представлялось возможным из-за интенсивной деструкции АП.

Выводы. Используемые АП позволяют не только регулировать стойкость к горению ТПУ, но и выполнять армирующее действие — повышать модуль упругости до 2,5 раз. АП заметно снижают стойкость к окислению ТПУ, что требует тщательного подбора стабилизаторов и их концентрации для гарантированного сохранения эксплуатационных характеристик весь требуемый период. Добавки МА и МЦ приводят к значительному повышению G' в области отрицательных рабочих температур.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В.К. Шелег, М.М. Шодиев, М.А. Леванцевич

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, Sheleh_v@tut.by

Введение. В последние годы, при изготовлении подшипников скольжения все чаще используют антифрикционные покрытия, получаемые газопламенными напылением металлических порошковых материалов. В этой связи представляет научный и практический интерес исследования их триботехнических характеристик

Цель исследований заключалась в сравнительной оценке триботехнических характеристик покрытий, сформированных газопламенным напылением, предполагаемых к последующему использованию для замены подшипников скольжения из литых или спеченных порошковых материалов.

Материалы и методы исследований. Объект исследований — пары трения «диск-полусфера». Образцы — диски диаметром 70 мм и толщиной 5 мм, выполненные из латунного проката Л63 (ГОСТ 15527-2004) (образец № 4), стали ШХ15, объемная закалка (HRC 60–63) (образец № 5) и с покрытием, сформированным газопламенным напылением, из порошков ПГ-19М-01 (образец № 1), ПР-БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5 (образец № 2), ПН-НД-42 (образец № 3). Контртело — сферический индентор (радиус сферы 500 мм) из стали 40Х объемной закалки (HRC 43–45). Трение индентора по плоской поверхности ($Ra = 0,5–0,6$ мкм) диска с покрытием выполняли на автоматизированном трибометре одностороннего вращения.

В процессе испытаний регистрировали коэффициент трения скольжения и весовой износ образцов. Условия испытаний: трение без смазочного материала, скорость вращения диска — $7,3 \text{ мин}^{-1}$, относительная скорость скольжения индентора по диску — $0,01 \text{ м/с}$, удельное давление — 40 МПа ($\approx 0,7$ критической нагрузки задира латуни Л63), продолжительность испытаний каждой пары 60 мин.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что через 25 мин. после начала испытаний у пары с образцом №5 (ст. ШХ15) возник задиры на поверхности индентора, сопровождаемый резким увеличением коэффициента трения скольжения с $0,24$ до $0,35$ (рис. 1, кривая 5). В результате пару сняли с испытаний. Остальные образцы выдержали испытания. При этом к концу цикла испытаний у всех испытываемых пар наблюдалось увеличение коэффициента трения скольжения. У пар с образцами (рис. 1): № 1 — с $0,2$ до $0,31$ (кривая 1); № 2 — с $0,21$ до $0,27$ (кривая 2); № 3 — с $0,15$ до $0,24$ (кривая 3); № 4 — с $0,15$ до $0,21$ (кривая 4).

Анализ данных по весовому износу (убыли

массы) образцов (рис 2) показал, что минимальный суммарный весовой износ отмечен у пары с образцом №4 (диск из латунного проката Л63). По сравнению с парами трения с образцами №1, №2, №3 он меньше, соответственно, в 4,3, 2,3 и 3,0 раза.

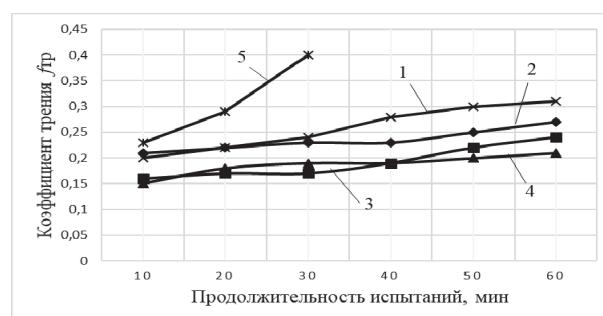


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения скольжения от продолжительности испытаний для пар трения с покрытиями, сформированными газопламенным напылением металлических порошков.

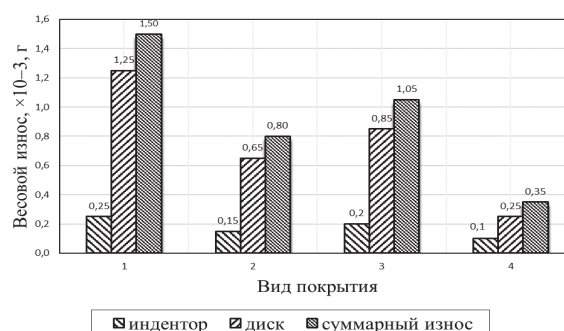


Рис. 2. Диаграмма значений величин износа для пар трения с образцами: ПГ-19М-01 (образец № 1), ПР-БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5 (образец № 2), ПН-НД-42 (образец № 3), латунный прокат Л63 (ГОСТ 15527-2004) (образец № 4).

Заключение. В условиях проводимых испытаний установлено, что пара трения с диском из латунного проката Л63, по сравнению с дисками с покрытием, сформированным газопламенным напылением металлических порошков, имеет не только минимальный коэффициент трения скольжения ($0,15–0,21$), но и наименьший суммарный износ трущихся образцов. В этой связи, замена подшипников скольжения, выполненных из латуни Л63 на подшипники с покрытием, сформированным из вышеупомянутых порошковых материалов, представляется нецелесообразной.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ В ОСАДИТЕЛЬНУЮ ВАННУ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МЕМБРАН ДЛЯ УЛЬТРА- И НАНОФИЛЬТРАЦИИ

С.С. Шиканов, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Цель: установление влияния добавки полиакриловой кислоты (ПАК) в осадительную ванну при получении мембран на основе полиакрилонитрила (ПАН) и полисульфона (ПС) на транспортные свойства мембран в процессе ультрафильтрации (УФ). Также целью являлось изучение влияния модификации ПАК пористой мембраны-подложки на основе ПАН на транспортные свойства композиционных мембран для нанофильтрации, полученных методом межфазной поликонденсации.

Материалы и методы. В качестве мембранообразующих полимеров использовали поли(акрилонитрил-со-метилакрилат) (ПАН, $M_w = 80$ кг/моль, соотношение звеньев акрилонитрила и метилакрилата — 94:6, Dolan, Германия) и полисульфон (ПС, $M_w = 45—55$ кг/моль, Ultrason S 6010, BASF, Германия). Мембраны были получены методом инверсии фаз способом мокрого формования при использовании воды или 0,5% водного раствора ПАК ($M_n = 450$ кг/моль) в качестве осадительной ванны. Бычий сывороточный альбумин (BSA, $M_w = 69$ кг/моль, $pI = 4,9$, Sigma Aldrich, Германия) и поливинилпирролидон ПВП К-30 ($M_n = 40$ кг/моль, ПВП К-30, Fluka) использовали в качестве модельных веществ для оценки транспортных свойств мембран в процессе УФ. Условия УФ — трансмембранное давление 0,1 МПа, температура 20 °С, перемешивание.

Получение композиционных мембран для нанофильтрации осуществляли формированием тонкого полиамидного слоя (ПА) на УФ мембрано-подложке методом межфазной поликонденсации с использованием водного раствора тетраэтиленпентамина (ТЭПА) и раствора тримезоилхлорида в нефрасе С2. Транспортные свойства композиционных мембран оценивали при нанофильтрации водного раствора сульфата магния с концентрацией 2 г/л при трансмембранном давлении 0,5 МПа в тангенциальном режиме.

Результаты и их обсуждение.

Установлено, что модификация мембран на основе ПАН ПАК путем добавления в осадительную ванну при формировании мембраны приводит к значительному уменьшению общей степени загрязнения (DT), а также к увеличению степени восстановления потока (FRR) с 38% до 94%. Найдено, что добавка ПАК в осадительную ванну приводит к незначительному уменьшению коэффициента задерживания как по К-30, так и по BSA (табл. 1). Установлено,

что наличие ПАК в осадительной ванне при формировании мембраны из ПАН и ПС приводит к существенному снижению производительности по воде.

Показано, что модификация ПАК при формировании мембран на основе ПС приводит к значительному увеличению коэффициента задерживания по BSA и в меньшей степени по К-30.

Таблица 1. Транспортные свойства мембран на основе ПАН и ПС в процессе УФ

Ванна	$J_{20}(H_2O)$, л/м ² ч	$R(K-30)$, л/м ² ч	$R(BSA)$, %	FRR, %	DT, %
ПАН					
Вода	384	61	95	38	42
ПАК	96	55	94	94	21
ПС					
Вода	259	71	66	33	30
ПАК	178	75	94	109	0

Установлено, что модификация с использованием ПАК мембраны на основе ПС приводит к увеличению FRR с 33% до 109% (табл. 1).

Выявлено, что добавка ПАК приводит к снижению степени общего загрязнения (DT) при УФ раствора BSA для мембраны ПАН и полному отсутствию DT в случае мембраны ПС. Это связано с наличием отрицательного заряда на мембране, обусловленного наличием карбоксильных анионных групп ПАК, и как следствие, наличием электростатического отталкивания между молекулами BSA и поверхностью мембраны при pH=7 фильтруемого раствора.

Установлено, что модификация пористой мембраны подложки на основе ПАН с использованием ПАК приводит к существенному снижению удельной производительности композиционной мембраны для нанофильтрации как по воде, так и по раствору сульфата магния (Табл. 2). При этом коэффициент задерживания (R) по сульфату магния увеличивается с 62 до 84%.

Таблица 2. Транспортные свойства нанофильтрационной мембраны на основе ПАН

Осадительная ванна	$J_{20}(H_2O)$, л/м ² ч	$J_{20}(MgSO_4)$, л/м ² ч	$R(MgSO_4)$, %
Вода	294	143	62
ПАК	48	34	84

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ (№X22КИ-036).

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ СЖАТИИ КОНСТРУКЦИОННО-АНТИФРИКЦИОННЫХ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

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

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь, Shilko_mpri@mail.ru

Введение.

Для восприятия максимальных контактных давлений на уровне ~ 200 МПа, характерных для высоконагруженных узлов трения, необходимо сочетание низкой интенсивности изнашивания и коэффициента трения $f \leq 0,1$ с высокой прочностью материала при сжатии. В этом плане перспективны направленно-армированные пластики с упрочняющим наполнителем в виде ориентированных волокон и тканей, вводимых в «антифрикционную» матрицу из полимера. Улучшению триботехнических свойств способствует применение «антифрикционного» наполнителя, например, углеродных нитей или политетрафторэтилена (ПТФЭ). В отличие от дисперсно-наполненных антифрикционных материалов, направленно-армированных композитам свойственна анизотропия, что необходимо учитывать в триботехнических расчетах. Представляет интерес определение коэффициента Пуассона, как меры сжимаемости материала, важной при проектировании деталей узлов трения, работающих в условиях стесненного сжатия.

Цель работы — определение упругопрочностных характеристик направленно-армированных стеклопластика на ПТФЭ-матрице при сжатии.

Материалы и методы исследования. Объектом изучения являлся направленно-армированный стеклопластик, полученный методом прессования из слоев, в которых стеклоткань сатинового плетения являлась армирующим наполнителем, а матричным материалом служил ПТФЭ. Наряду с отмеченной выше анизотропией механических свойств, в данном случае имеет место сочетание относительно низко модульной и малосжимаемой полимерной матрицы с высоко модульным (порядка 70 ГПа) стеклотканевым наполнителем и слабое адгезионное взаимодействие наполнителя и матрицы.

Для испытаний на сжатие использовались образцы стеклопластика в виде прямоугольных пластин толщиной $h = 2,4$ мм, шириной $b = 25$ мм и длиной $l = 140$ мм. Выборка включала 9 образцов.

Упругопрочностные характеристики определяли по методу статических механических испытаний при комбинированной сжимающей нагрузке по ГОСТ Р 56812 на машине «Instron 5567» (Великобритания). Для центровки и предотвращения потери устойчивости образца при сжатии использовали рекомендуемое ГОСТ Р 56812 приспособление, изготовленное из прозрачного полиметилметакрилата (рис. 1, а). Продольные и поперечные деформации регистрировали тензоусилителем «TS32L1-02» (ИПФ НАН Беларуси, Беларусь).

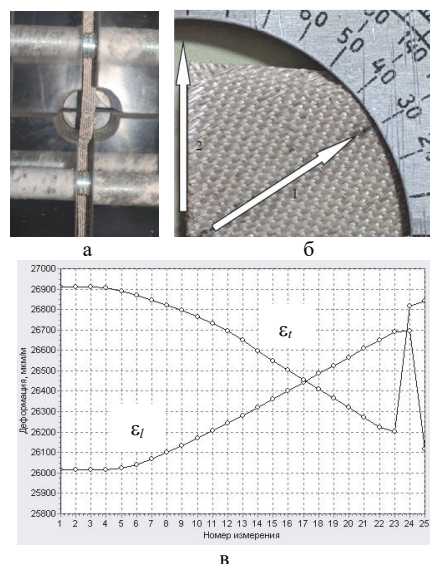


Рис. 1. Способ нагружения и характер разрушения ПТФЭ-композиата при сжатии (а), ориентация нитей стеклоткани (стрелками показаны направления нитей основы и оси нагружения) (б), зависимости продольной ϵ_l и поперечной ϵ_t деформаций от нагрузки (в).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что стеклопластик на основе политетрафторэтилена имеет следующие средние значения упругопрочностных параметров при сжатии: модуль упругости $E^c = 3,0$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu^c = 0,79$, предел прочности $\sigma_b^c = 22,3$ МПа. Потеря несущей способности образцов обусловлена расслаиванием материала.

Несовпадение направления основы стеклоткани и оси нагружения, а также низкая адгезия ПТФЭ к наполнителю являются причинами аномально высокого значения коэффициента Пуассона ν^c стеклопластика на ПТФЭ связующем. Значительные резервы прочности изучаемых слоистых полимерных композитов могут быть реализованы пространственным армированием для увеличения межслоевой прочности.

Заключение.

Полученная информация может быть использована для выполнения триботехнических и прочностных расчетов высоконагруженных узлов трения из тканых композитов.

Благодарности. Работа выполнена по заданию 4.2.3 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» и при поддержке БРФФИ (T21ЭТ-016).

ЗАОЧНЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2022)

28—30 июня 2022 г., Гомель, Беларусь

SWELLING OF BIODEGRADABLE GLUCOMANNAN AND ZEIN FILM COMPOSITES

I.B. Ismoilov¹, Z.K. Muhidinov², and Kh.M. Abdullaev³

¹ Tajik Technical University named after M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan;

² Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin, Tajikistan National Academy of Sciences, Dushanbe, Tajikistan;

³ Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan; zainy@mail.ru

Aims. This work is devoted to the study of the swelling kinetics of biodegradable packaging films based on glucomannan and zein composites.

Materials and methods. Biopolymer films based on a water-soluble polysaccharide, glucomannan (GM), obtained from the root tubers of the *Eremurus hissaricus* plant (*E.hissaricus*) and zein (Z) protein, isolated from corn flour. The swelling properties of the composites were evaluated by the degree of swelling (W) determined by the amount of water vapor absorbed by the polymers per unit weight of the composite. The experiments were conducted on composites with different Z/GM ratios: 1.0, 1.25, 1.50, 1.75 и 2.0.

Results and their discussion. The dependences $W=f(t)$ of the biocomposites are typical kinetic curves typical for limited swelling polymers. Thus, for different composites the equilibrium degree of swelling (W_{max}) is established at different time intervals; the composites with Z/GM=1.0 have the highest swelling capacity and, as the relative share of the hydrophobic component (Zein) increases, the swelling capacity of films decreases and reaches equilibrium values within a shorter time.

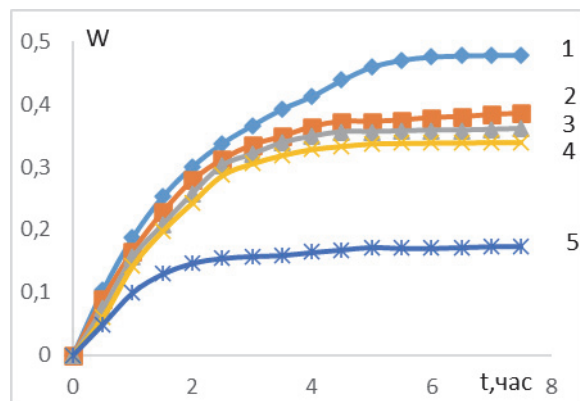


Fig. 1. Time dependence of the degree of swelling of composites with different Z/GM ratio: 1- 1.0; 2- 1.25; 3- 1.50; 4- 1.75; 5- 2.0.

It is obvious that the high degree of swelling and water-retaining capacity of composite films with a low content of Z/GM can be due to structural features of GM, which is a nonionic polysaccharide, hydrocolloid, consisting mainly of free, partially methylated or acetyl hydroxyl groups [2]. The osmotic penetration of water molecules into composites and their swelling are fa-

vored by the affinity of water and glucomannan molecules, as well as by the segmental movement of hydrophilic GM chains capable of rapid conformational changes.

In the films obtained by molecular interaction of zein and glucomannan [3], a rigid network of intermolecular contacts of the hydrophobic polymer - zein limits the mobility of biopolymer chains, and, as can be seen from Fig. 1, the degree of swelling of composites with a ratio of Z/GM>1.5 becomes significantly lower compared to composites containing a larger amount of GM.

It is shown that the swelling process, which is limited by the rate of diffusion of water vapor into the composite phase, described by a first-order kinetic equation. By approximating the swelling curves using a linear trend function of the Excel-2016 program, the equilibrium values of the degree of swelling, the kinetics of the change in the swelling rate, as well as the values of the swelling rate constant for each composition were determined.

Thus, this study made it possible to evaluate the nature of the change in the degree of swelling of the obtained hydrogel films based on zein and glucomannan, to determine the optimal ratio of biopolymers for obtaining films with controlled swelling. The optimal composition of composite films with a zein content of 60–63% was developed and recommended for the production of biodegradable packaging materials with satisfactory mechanical, moisture-retaining, moisture-protective properties and slightly soluble in water. The resulting composite films can be used as a biodegradable film for long-term storage and transportation of fruits and vegetables.

1. Ismailov I.B., Malikov T.S., Nasriddinov A.S., Dzhonmurodov A.S., Muhidinov, Z.K. Formation of biodegradable composites based on zein and glucomannan // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. - 2019 (62), No. 3-4, 207-214.
2. Muhidinov Z.K., Bobokalonov J.T., Ismoilov I.B., Strahan G.D., Chau H.K., Hotchkiss T.A., Liu L.S. Characterization of two types of polysaccharides from *Eremurus hissaricus* roots growing in Tajikistan // Food Hydrocolloids. - 2020 (105), - 105768. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105768>. IF: 7.05.
3. Ismailov I.B., Abdullaev Kh.M., Nasriddinov A.S., Muhidinov Z.K. Physico-mechanical properties of biodegradable composites based on zein and glucomannan// Polymeric materials and technologies. - 2020 (6). -No. 1, 25-32. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2020-6-1-25-32>.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION
OF ALGINATE-CAPPED SILVER NANOPARTICLESV.V. Nikalaichuk¹, K.S. Hileuskaya¹, V.I. Kulikouskaya¹,
A.I. Ladutska², A.V. Sidarenka², and K.M. Grigoryan³¹ Institute of Chemistry of New Materials of NAS of Belarus, Minsk, BELARUS, e-mail: kulikouskaya@ichnm.by² Institute of Microbiology of the NAS of Belarus, Minsk, BELARUS³ SNCO MESCS RA “Yerevan State University”, Yerevan, ARMENIA

Currently, an in-depth study was conducted on synthesis of eco-friendly silver nanoparticles using plant extracts and natural compounds (polysaccharides, polyphenols, etc.) as reducing and/or capping agents [1, 2]. “Green” synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) by the action of polysaccharides is a promising method for obtaining new materials with improved antimicrobial activity [3, 4].

The purpose of this work was to develop “green” approach for the preparation of silver nanoparticles with the assistance of natural polysaccharide (alginic acid) and evaluate their antimicrobial potential against strains causing pseudomoniasis in fish.

Materials and methods. In this work AgNPs were synthesized via chemical reduction of silver nitrate with previously oxidized sodium alginate (Alg). Such parameters as temperature (80–100 °C), pH (from 8 to 11), Alg concentration (1 and 10 mg/ml), reaction time, stirring and oxygen access have been varied during the synthesis.

Result and discussion. The synthesized alginate-capped silver nanoparticles (Alg-AgNPs) contain inorganic core (AgNPs) stabilized by polysaccharide shell. Therefore, in the reaction, Alg macromolecules act both as a reducing and stabilizing (capping) agent.

Alg-AgNPs obtained under the assistance of 1 mg/mL Alg were characterized by a narrow symmetrical peak with an absorption maximum at 400–407 nm. Increase in Alg content in reaction mixture up to 10 mg/mL resulted in the formation of sample with a broad asymmetrical peak with an absorption maximum at 407–422 nm.

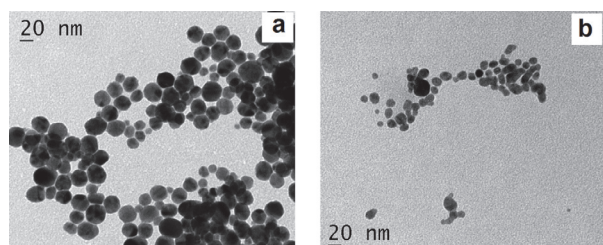


Fig. 1. TEM-images of Alg-AgNPs obtained with the assistance of 1 (a) and 10 (b) mg/mL Alg solution

It has been established that negatively charged (zeta potential of about $-(50-70)$ mV) spherically-shaped Alg-AgNPs with a hydrodynamic diameter of 27–54 nm and a size in the dried state less than 30 nm were formed under the action of dilute Alg solution (1 mg/mL) (Fig. 1, a). In the concentrated Alg solution (10 mg/mL), polydisperse particles prone to aggregation

were fabricated. Their hydrodynamic diameter was 230–430 nm, and the size in the dried state did not exceed 30 nm (Fig. 1, b). An increase in the synthesis temperature from 80 to 100 °C in both cases led to an enhance in absorbance value indicating the increase in completeness of the reaction.

The synthesized Alg-AgNPs exhibited antibacterial activity against different strains of *Pseudomonas* (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas gessardii*, *Pseudomonas putida*): zones of growth inhibition were 10–14 mm (Fig. 2).

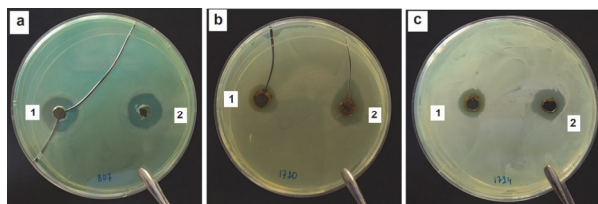


Fig. 2. Inhibition zones of Alg-AgNPs obtained with the assistance of 1 (1) and 10 (2) mg/mL Alg solution against *Pseudomonas aeruginosa* (a), *Pseudomonas gessardii* (b) and *Pseudomonas putida* (c)

It can be concluded that the synthesized Alg-AgNPs are promising agents for the development of new effective antibacterial materials for the prevention or treatment fish diseases causing by *Pseudomonas* strains.

Acknowledgements. The research was supported financially by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant № X21ARM-001) and Ministry of Education, Science, Culture and Sports of the Republic of Armenia (Project Code: 21SC-BRFFR-4A025).

1. Huh A.J., Kwon Y.J., “Nanoantibiotics”: A new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era // *J. Control. Release.* – 2011(156), 128–145.
2. Ghosh C., Sarkar P., Issa R., Haldar J. Alternatives to Conventional Antibiotics in the Era of Antimicrobial Resistance // *Trends Microbiol.* – 2019 (27), 323–338.
3. Kulikouskaya V., Hileuskaya K., Kraskouski A., Kozerozhets I., Stepanova E., Kuzminski I., You L., Agabekov V. Chitosan-capped silver nanoparticles: A comprehensive study of polymer molecular weight effect on the reaction kinetic, physicochemical properties and synergetic antibacterial potential // *SPE Polymers.* – 2022 (3), № 2 – P. 77-90.
4. Hileuskaya K., Ladutska A., Kraskouski A., Novik G., Kozerozhets I., Kozlovskiy A., Agabekov V. ‘Green’ approach for obtaining stable pectin-capped silver nanoparticles: physicochemical characterization and antibacterial activity // *Colloids Surf. A.* – 2020 (585), 124141

FORMATION OF EMULSION MACROCAPSULES BASED ON PROTEIN SERICIN AND APPLE PECTIN

Z.U. Sherova, S.R. Usmanova, A.S. Dzhonmurodov, and Z.K. Muhidinov

Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan, surayo.usmanova@gmail.com

Aims. Nano- and macroencapsulation as a technology for creating systems for targeted delivery and protection of biologically active and medicinal substances is widely used in the production of food and pharmaceuticals products. These are long-acting therapeutic agents that protect the active ingredient from the effects of gastric juice upon oral administration of a variety of drugs, especially polypeptides and vaccines, through oral administration in a biodegradable shell [1–3]. The purpose of this work is the formation of emulsion macrocapsules based on biopolymers of sericin protein and apple pectin for the encapsulation of biologically active compounds.

Materials and methods. Sericin isolated by 0.5% NaCO₃ solution from the cocoon shells of the silkworm *Bombyx mori*; low-methylated pectin obtained from apple pomace with a degree of esterification (DE) of 38.0% and a molecular weight (Mw) of 110 kDa; and polyphenolic compounds (PPC) extracted from propolis by 70% ethanol. Macrocapsules were obtained according to the method described in [4] with some changes: 3 ml of vegetable oil containing 5 ml of a 0.5% of PPS in alcohol solution was poured into a container installed in a water bath at a temperature of 60°C and, with high speed stirring using IKA T-25 digital homogenizer (ULTRA TURRAX, IKA-WERKE GMBH & CO. KG, Germany) at a 12 000 rpm. 10 ml of a 0.4% aqueous solution of sericin (primary emulsion) was added to this mixture. Then 15 minutes, without interrupting stirring, a calculated amount of a 0.2% pectin solution in 0.1 M NaCl was dropwise added to obtain a secondary emulsion, and stirring was continued for another 20 minutes. Then, after cooling and over several days, the emulsion volumes obtained were measured to assess their stability by volume over time. After reaching a stable volume of the cream layer, the resulting emulsions were washed several times with distilled water to remove unbound PPC.

PPC containing macrocapsules in emulsion with different ratios of sericin and pectin were prepared using this method. Stability of macrocapsules in washed emulsions were evaluated microscopically on an OLYMPUS BX53 microscope (OLYMPUS U-TR30-2, Japan). The number of macroparticles and their sizes were determined using the computer program

OLYMPUS cellSens Standard. On the basis of these data, distribution curves of particles of macrocapsules were plotted; their sizes and their volume distribution by particle sizes were estimated.

Results and discussion. A method has been developed for the formation of the drug delivery system of the active ingredient (propolis PPC), in emulsion macrocapsules, with sericin protein and stabilized by LM-pectin. Macrocapsules were obtained by the method of two-stage formation of an oil-in-water emulsion stabilized by complexes of sericin and LM-pectin in the presence of sodium counterions.

The characteristics of the resulting emulsions at various ratios of protein and LM-pectin are discussed. It was shown that the maximum emulsion volume with the smallest dimensions ($d_{4,3}$ equal to 1.5 μm) and the largest number of particles per ml (917000) is formed at sericin/pectin weight (molar) ratios of 5:1 (16:1). Although, other protein/pectin ratios studied showed high emulsion stability, but having relatively lower size and volumes. The largest creamy layer was formed at a weight ratio of 3:1, and then reduced at ratios of 10:1 and 5:1. The volume of the cream layer was minimal and satisfactory (2.8 ml) for the optimal selected ratio (5:1).

Thus, the resulting PPC delivery systems in the form of macrocapsules stabilized with biopolymers, respectively, require further research to study the kinetics and mechanism of the release of the active ingredient underlying their biological activity in order to gain access to new natural antioxidants for the pharmaceutical and food industries.

1. Polysaccharide Carriers for Drug Delivery. Edited by S. Maiti and S. Jana. Woodhead Publishing (Elsevier), - 2019 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102553-6.00001-5>.
2. Devi N., Sarmah M., Khatun B., Maji T.K. Encapsulation of active ingredients in polysaccharide–protein complex coacervates. - Advances in Colloid and Interface Science, - 2017, (239), 136–145.
3. Muhidinov Z.K., Bobokalonov D.T., Usmanova S.R. Pectin is the basis for creating functional food. Dushanbe, Sifat-Offset LLC - 2019, 192.
4. Sherova Z.U., Usmanova S.R., Muhidinov Z.K. Microencapsulation of polyphenolic compounds based on sericin and pectin. Abstracts Rep. conf. with international participation, (Minsk, May 29, 2020), 196–197.

THE PROCESS OF OBTAINING POLYACRYLAMIDE-BASED COPOLYMERS VIA FRONTAL COPOLYMERIZATION IN CONTINUOUS MODE

M.B. Shuliakouskaya¹, N.V. Zakharevich¹, and Y.V. Hryniuk²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: marieshulyakouskaja@gmail.com

²Research Institute for Physical and Chemical Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Polyacrylamide-based polymers are widely used in agriculture, medicine, for sewage cleaning etc. [1]. The main way of acrylamide (AA) copolymers obtaining is free-radical polymerization. The less common way is frontal polymerization (FP). It is a simple and convenient method of polymer synthesis due to low energy consumption during the process since FP reactions are exothermic and self-sustained [2]. Continuous mode of FP is even less studied [3].

In the present work FP in continuous mode was used for acrylamide (AA) and sodium 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonate (AMPS-Na) at 95:5 in dimethylsulfoxide (DMSO) at equal molar ratio of comonomers and the solvent. Ammonium persulfate (APS) was taken as an initiator.

We have shown that it is possible to carry out AA-AMPS-Na copolymerization by means of FP in continuous mode at the minimum initiator concentration of 0,1 mol. %. The evidence of the FP reaction is the linear dependence of the distance, passed by the front, on time (Figure).

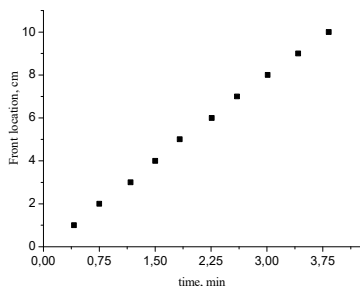


Figure – The dependence of the distance, passed by the front, on time during FP at the concentration of APS at 0,25 mol. %

The macrokinetics of FP in continuous mode has been studied (Table 1).

Also, we have discovered that the products of copolymerization are mainly water-soluble so we have measured intrinsic viscosity of the copolymers obtained by means of capillary viscometry using the Mark–Houwink–Sakurada equation (Table 2).

Table 1. The macrokinetics of the process of FP in continuous mode

APS concentration, mol. %	Front rate, cm/min	Front temperature, °C
0,1	2,69	97,4
0,25	5,73	121,2
0,5	7,01	124,0
1	7,30	135,5
2	13,16	145,3

Table 2 – The intrinsic viscosity values of water-soluble copolymers

APS concentration, %	$[\eta]$, dl/g
0,25	3,57
0,5	2,56
1	0,57
2	0,32

We have shown the possibility of carrying out FP of polyacrylamide-based polymers and have determined its macrokinetic characteristics. As we can see from Table 1, the front rate and front temperature depend on the initiator concentration. The maximum front rate was more than 13 cm/min at the APS concentration of 2 mol. %. Also we have discovered that the intrinsic viscosity values depend on the initiator concentration as well. The more APS concentration, the less intrinsic viscosity of copolymer was obtained.

1. Gavini E., Mariani A., Rassu G., Bidali S., Spada G., Bonferoni M. C., Giunchedi P. Frontal polymerization as a new method for developing drug controlled release systems (DCRS) based on polyacrylamide // *European Polymer Journal*, 2009, vol. 45, is. 3, pp. 690–699.
2. Тоноян А.О. и др., Фронтальная сополимеризация акриламида с метилметакрилатом и стиролом в присутствии наночастиц SiO₂, TiO₂. Теплофизические свойства полученных нанокомпозитов, Изв. НАН РА и ГИУА, Т. LXVI, №1 (2013)
3. S.P. Davtyan, A.O. Tonoyan, Frontal polymerization in continuous-flow reactors, *Review Journal of Chemistry*, 9 (4), 175-196 (2019)

PLASTIC LUBRICANTS OPTIMIZED BY CARBON NANOSTRUCTURES

N.V. Usol'tseva¹, A.S. Parfenov², M.A. Shilov³,
D.N. Stolbov⁴, A.I. Smirnova¹, and S.V. Savilov⁴¹Ivanovo State University, Ivanovo, RUSSIA, e-mail: nv_usoltseva@mail.ru²Ivanovo State Medical Academy, Ivanovo, Russia³Ivanovo State Energy University, Ivanovo, Russia⁴Moscow State University, Moscow, Russia

Purpose. A comprehensive interdisciplinary study of the influence of carbon nanostructures (CNS) structural features on the tribological and rheological characteristics of plastic lubricants (PL) was carried out in order to establish the fundamentals of physics and chemistry for optimizing properties of domestic PLs, including for import substitution.

Materials and methods. In the studies were used carbon nanostructures both commercial and synthesized by the authors, including functionalized ones, which represent 2D, 1D and 0D carbon allotropic modifications. The concentration range of CNS varied in different experiments from 0.1 to 2.5 wt. %.

As the basis for the studied dispersions one imported (Claas AGRIGREASE EP2, (I)) and two domestic (Gazpromneft LX EP2 (II) and Litol-24 (III)) PLs have been selected. Some experiments were additionally carried out on model greases with medical vaseline (VM) as the base. The "ring-disc" friction pair geometry was used. Material of the ring is quenched steel ShKh15 (analogue of AISI Steel 52100); the disc was made of chrome containing quenched steel 40X (analogue of AISI Steel 5135). Load range varied from 0 to 250 N. The rheological properties of PLs and dispersions PL/CNS were studied by two methods - shear (destructive) deformations and oscillatory (non-destructive) deformations.

Result and discussion. It has been shown that the rheological and tribological characteristics of PL/CNS dispersions are significantly affected by PL type, apparently due to the interaction of CNS with various components of these lubricants.

The general trend of increasing friction coefficient with a change in the structure of carbon allotropic modifications from 2D to 1D and 0D as additives to PL and VM has been experimentally established.

Independent methods have experimentally established and substantiated the presence of two groups of CNS. Representatives of one group (multilayered oxidized graphene (Gr), few-layer graphite fragments (MGF, N-MGF), single-walled (SWNT) and multi-walled (MWNT) carbon nanotubes) lead to a decrease in friction coefficient in the model dispersion of VM/CNS (by a maximum of 67%), while CNS of the other group (Taunit-M and fullerene C60) increase friction coefficient (by a maximum of 33%) compared to base VM. The ambiguity of the Sh influence as an additive to PLs is explained by the variation of its self-organized forms that appear in tribo-systems at different concentrations and increasing loads. For the first time,

the following sequence of changes in the friction coefficients of VM/CNS dispersions depending on the type of CNS was determined: Gr < N-MGF < MGF < SWNT < MWNT < VM = Sh < C60 < Taunit-M.

The rheological characteristics of PLs, being physical and chemical indicators, are extremely important parameters that determine the course of tribological processes.

It is shown that under shear deformations, the magnitude of the viscosity decrease of domestic PL systems depends on the spatial structure of CNS. By the method of oscillatory deformations it have been shown that CNS additives reduce the elastic properties of PLs, and the magnitude of this reduction depends both on the base PL and on the type and concentration of CNS. In this case, the type and concentration of CNS have a significant effect on both the thixotropy time and the destruction energy of VM/CNS dispersions.

From the performed interdisciplinary tribological and rheological studies, which have been carried out on the example of a model lubricant, a general conclusion was made for the first time. The conclusion states that an increase in the spatial dimension of the studied carbon allotropes improves the lubricity of PLs by reducing the system destruction energy and the thixotropy time.

The performed studies make a significant contribution to the development of an interdisciplinary direction in the optimization of tribological processes using carbon nanostructures.

Acknowledgements. The research was supported financially by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant No FZZM-2020-0006).

1. Parfenov A.S., Berezina E.V., Smirnova A.I., Gvozdev A.A., Shilov M.A., Dyachkova T.P., Rozhkova N.N., Savilov S.V., Usol'tseva N.V. Tribological Properties of Plastic Lubricants in Composites with Various Carbon Nanostructures // Friction and wear. – 2019 (40), No 5 – P. 453–460.
2. Shilov M.A., Smirnova A.I., Gvozdev A.A., Rozhkova N.N., Dyachkova T.P., Burkov A.A., Stolbov D.N., Savilov S.V., Usol'tseva N.V. Rheology of Plastic Lubricants with Additives of Carbon Nanostructures of Various Type // Friction and wear. – 2019 (40), No 6 – P. 546–554
3. Shilov M., Smirnova A., Gvozdev A., Rozhkova N., Dyachkova T., Burkov A., Stolbov D., Savilov S., Usol'tseva N. Rheological properties of «Vaseline – Carbon nanoparticles» model systems under conditions of non-destructive deformations // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. – 2019 (693) – P. 012034.
4. Parfenov A.S., Shilov M.A., Smirnova A.I., Berezina E.V., Tkachev A.G., Burkov A.A., Rozhkova N.N., Usol'tseva N.V. Influence of various carbon allotropes on tribological and rheological characteristics of model lubricating systems // Friction and Wear. – 2021 (42), No 3 – P. 217–224.

МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СООТВЕТСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ

С.В. Авдейчик¹, А.Н. Лесун², В.А. Струк², А.С. Антонов²

¹Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь;

²Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь; antonov.science@gmail.com

Введение. Особенности эксплуатации конструктивных элементов металлополимерных систем, изготовленных из фторкомпозитов, обуславливают необходимость разработки методологических подходов к технологии, учитывающих многофакторность механизмов структурообразования, обеспечивающих формирование структуры с оптимальным сочетанием деформационно-прочностных и триботехнических характеристик. К числу перспективных подходов в данном аспекте относят концепты многоуровневого модифицирования и энергетического и технологического соответствия компонентов, предложенные в наших исследованиях [1].

Представляет существенный научный и практический интерес разработка методов реализации этих концептов в практических технологиях фторкомпозитов, в том числе содержащих повышенные концентрации модифицирующих компонентов.

Материалы и методика исследований. В качестве объекта для исследований были выбраны композиционные материалы на основе промышленных марок политетрафторэтилена (Ф-4 ПН, Ф-4 ПН 90, Ф-4 ТМ), производимых по нормативной документации. Для модифицирования полимерной матрицы использовали дисперсные фрагменты углеродных волокон (УВ), полученные измельчением углеродных лент производства ОАО «Светлогорск Химволокно» марки ЛО-1-12Н, технического углерода (ТУ) марки П234, ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ), промышленно выпускаемых под торговой маркой «Форум». Структурные параметры фторкомпозитов исследовали методами ИК-спектроскопии, оптической, атомной силовой и растровой электронной микроскопии.

Результаты и обсуждение. Разработан алгоритм формирования многоуровневой оптимизированной структуры композитных материалов с повышенными параметрами характеристик на основе ПТФЭ, согласно которому на основе методологического подхода управления процессами структурообразования путем направленного изменения параметров энергетических характеристик компонентов возможно создание предпосылок образования оптимизированной многоуровневой структуры на стадиях подготовки компонентов, их совмещения, формирования заготовок и изготовления изделий.

В результате исследований установлено, что сочетание активных наноразмерных компонентов,

образуемых в процессе термической обработки, обеспечивает реализацию синергического эффекта повышения параметров триботехнических и деформационно-прочностных характеристик композиционного материала.

Другим методологическим подходом реализации принципа энергетического и технологического соответствия компонентов является их активирование непосредственно в процессе формирования и переработки композита на разных стадиях технологического процесса с использованием механохимических воздействий. Сочетание технологий механохимического (МА), термомеханического (ВС) и механохимического активирования (ХМ) компонентов фторкомпозитов с содержанием УВ от 10 до 40 мас.% обеспечивает возможность снижения негативного влияния структурного парадокса, рассмотренного в исследованиях А.К. Пугачева, Ю.К. Машкова.

Заключение. Разработанные технологии, основанные на активировании компонентов при совместной термической, термомеханической (ВС), механохимической (МА, ХМ) обработке позволяют не только достичь синергического сочетания повышенных параметров характеристик, но и расширить марочный диапазон фторкомпозитов, в том числе высоконаполненных, содержащих до 40–45 мас.% УВ, обладающих повышенными теплофизическими и нагрузочными параметрами.

Благодарности. Исследования проводились в рамках выполнения комплексного задания 8.4.1.4 «Механизмы направленного структурообразования функциональных термопластичных композитов при энергетических и механических воздействиях» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы, а также комплексного задания 5.6 «Исследование процессов создания и использования полимерных упаковочных материалов для обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов» ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы.

1. Avdeychik S., Antonov A., Lesun A., Struk V. and Goldade V. Implementation of the Concept of Energy and Technological Compliance of Components in the Technology of Fluorocomposites // J. Mater. Sci. Eng. A. — 2022 (12), 1, 28—39

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ В ВОДНОЙ СРЕДЕ ИЗ МИШЕНЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МЕТАЛЛОВ

А.Г. Анисович¹, М.И. Маркевич², В.Л. Журавлева³

¹Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики», Минск, Беларусь; anna-anisovich@yandex.ru

²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

³Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

В настоящее время создаются функциональные устройства на основе наночастиц. Усилился интерес к наночастицам полупроводников. Наночастицы фосфида индия не имеют токсичных элементов, имеют оптимальную ширину запрещенной зоны, что обуславливает их применение в светоизлучающих устройствах, биологических маркерах, солнечных батареях). Наночастицы кремния перспективны при разработке методов тонкой полировки, алюминия - для светодиодов. При получении наночастиц особенно эффективны импульсные лазерные методы, которые позволяют получать частицы необходимой морфологии и без поверхностных загрязнений.

Цель работы — получение наночастиц в двухимпульсном режиме лазерного воздействия из мишеней InP, Al, Si в водной среде и исследование их морфологии.

Материалы и методы. Для получения наножидкости использован лазер (LS-2134D). В качестве мишеней применяли монокристаллический фосфид индия, легированный цинком, кремний, силумин АЛЗ. В качестве жидкости использовали дистиллированную воду, которую в процессе эксперимента принудительно не перемешивалась. Исследование морфологии наночастиц производилось с использованием растровых электронных микроскопов S-4800 и MIRA-3.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены наночастицы InP, Al, Si. На поверхности

крупной наночастицы фосфида индия диаметром 268 нм наблюдаются более мелкие частицы размером 10-20 нм. Также наблюдаются и конгломераты частиц от 100 до 200 нм. Частицы имеют округлую форму, вероятно образование частиц происходило по механизму пар→жидкость; частицы находятся в аморфном состоянии. Крупная частица алюминия имеет размер 1500 нм (мишень — силумин АЛЗ). На ее поверхности видны более мелкие частицы. Некоторые из них имеют правильную кристаллографическую огранку. Состав частиц — 98% алюминия и 2% кремния. Получены наночастицы кремния размером порядка 700 нм, а также мелкие частицы размером порядка 20 нм (мишень — монокристаллический кремний). Частицы имеют округлую форму. Состав частиц — кремний.

Выводы. Отработана методика генерации наночастиц металлов и полупроводников в водной среде в двухимпульсном режиме. В результате диагностики методом растровой электронной микроскопии показано, что в результате лазерной абляции формируется ансамбль частиц разного размера от 10 нм до 700 нм. Частицы кремния и фосфида индия имеют округлую форму, что позволяет говорить об их аморфном состоянии. На поверхности частицы алюминия в процессе роста образуются кристаллические частицы с плоскостями {111} с минимальной граничной энергией.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БрФФИ № T21ЭТ-001

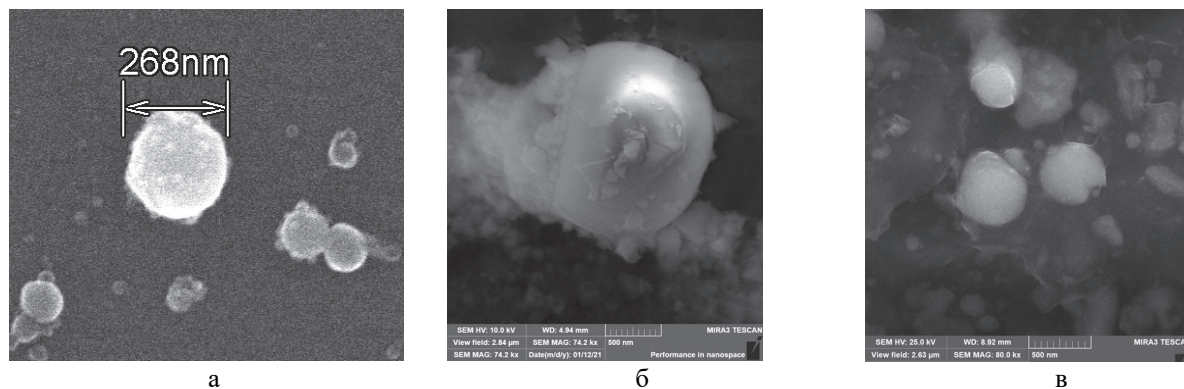


Рис. 1 Наночастицы фосфида индия (а), алюминия (б) и кремния (в)

МЕХАНИЗМЫ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИАМИДНЫХ МАТРИЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФфуЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.С. Антонов¹, В.А. Струк¹, Д.В. Нахват¹, П.В. Клочко¹, Н.Р. Прокопчук²

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь; antonov.science@gmail.com;

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь

Введение. Технологии диффузионного модифицирования полимерных материалов, научные основы которых были разработаны профессором Мачюлисом А.Н. [1] и развиты профессором Песецким С.С. [2] в период 1970—1990 гг., не получили должного дальнейшего развития, что не позволило осуществить широкое их применение в практике полимерного материаловедения. Поэтому необходимо проведение системных исследований по установлению механизмов модифицирующего действия наночастиц, полученных с применением диффузионных технологий при подготовке сырьевых компонентов, переработке нанокомпозитов и обработке изделий.

Целью данного исследования являлась разработка нанокомпозитов с доступными ценовыми параметрами и технологий их получения и переработки в функциональные изделия, адаптированных к реально действующему оборудованию предприятий ведущих отраслей экономики.

Материалы и методика исследований. В качестве объектов исследования были выбраны алифатические полиамиды отечественного и зарубежного производства (ПА6, ПА6.6, ПА12).

Для модифицирования полиамидных матриц использовали дисперсные частицы металлов (меди), полученные термолизом металлосодержащих соединений (муравьинокислых солей – формиатов в среде расплава). Наноразмерный металлосодержащий модификатор получали термообработкой гранулированных или порошкообразных полуфабрикатов, диффузионно модифицированных в водных растворах металлосодержащего прекурсора (формиата меди) в течение 1—10 часов.

Сравнительную оценку эффективности действия наноразмерных модификаторов различного состава в полиамидных исходных, смесевых и композиционных материалах осуществляли по параметрам деформационно-прочностных характеристик стандартных образцов, повергнутых термоокислительному старению при температуре $150 \pm 5^\circ\text{C}$ в среде воздуха в течение до 200 часов. В качестве критерия был выбран параметр прочности при растяжении σ_r , МПа.

Результаты и обсуждение. Развивая представления о диффузионной стабилизации полимеров, которые были разработаны профессором Мачюлисом А.Н., нами предложено вводить в качестве ста-

билизатора наноразмерные частицы металлов, прежде всего меди, из медьсодержащих солей – формиатов (солей муравьиной кислоты) и оксалатов (солей щавелевой кислоты). Водные растворы этих солей при термообработке разлагаются с образованием наноразмерных частиц, обладающих синергическим эффектом. При введении в состав полимерных материалов наноразмерных частиц металлов реализуются различные механизмы повышения стойкости композитов к воздействию окислительных сред: 1) за счёт изменения энергии макромолекул; 2) за счёт образования надмолекулярной структуры; 3) за счёт изменения своего исходного строения и трансформации в металлосодержащее соединение, которое выполняет функцию антиоксиданта.

Предложенный метод модифицирования полиамидных матриц позволил получить технически значимый эффект, который был широко использован нами в различных практических приложениях при модифицировании как полуфабрикатов (в виде гранул или порошков), так и готовых изделий.

Экспериментальные исследования показали, что диффузионная обработка гранулированного ПА6 водным раствором формиата меди $\text{Cu}(\text{HCOO})_2$ в течение 1—10 часов приводит к существенному изменению стойкости стандартных образцов к термоокислительному старению [3].

Заключение. Модифицирование полиамидных матриц посредством их диффузионной обработки функциональными жидкофазными средами относится к одному из эффективных направлений, которое является достаточно простым в технологическом исполнении, не требует использования дорогостоящего специального оборудования.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22-075 от 04.05.2022).

1. Мачюлис А. Н., Торнау Э. Э. Диффузионная стабилизация полимеров. — Вильнюс: Минтис. — 1974
2. Песецкий С. С., Каплан М. Б., Старжинский В. Е., Мачюлис А. Н. Износостойкость диффузионно-стабилизированного полиамида. — 1984 (5), №4, 615—621
3. Антонов А. С., Авдейчик С. В., Воронцов А. С., Струк В. А. Технологические аспекты получения композиционных полимерных материалов на основе полиамида-6 производства ОАО "Гродно азот" // Нефтехимический комплекс. — 2017 (1), 6—9

К ПРОБЛЕМЕ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРОВ В БЕЛАРУСИ

А.Л. Антонова¹, В.Е. Сыцко¹, В.М. Шаповалов², С.В. Зотов²

¹Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации», г. Гомель, Беларусь; viraaina3@yandex.by

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. В Республике Беларусь образуется большое количество промышленных (в том числе полимерных) отходов, загрязняющих окружающую среду и занимающих значительные площади. Отходы пластиков наличествуют в виде отработанных деталей, упаковки, тары и т.п. Источниками полимерных отходов являются сервисные, сельскохозяйственные и перерабатывающие сельхозпродукцию предприятия, объекты общественного питания и здравоохранения, культуры, отдыха и спорта, учебные заведения и бытовой сектор. Процесс сжигания или естественного разложения пластмасс сопровождается выделением токсичных веществ. Пластики устойчивы к химическому и биологическому разложению, вследствие чего сохраняются в окружающей среде в течение десятков лет. Перспективным направлением утилизации отходов полимеров признана их повторная переработка (рециклинг). Однако вторичные полимеры обладают крайне нестабильными свойствами.

Цель работы состоит в постановке проблемы рециклинга вторичных полимеров с упором на возможность их параллельного модифицирования с целью компенсации ухудшения свойств.

Материалы и методы: патентно-информационный поиск, анализ статистической и рекламной информации.

Результаты и их обсуждение. Согласно статистическим данным, за 2020 г. в Беларуси собрано 97,6 тыс. тонн полимерных отходов [1]. Установлено, что наибольшую проблему при организации целевого рециклинга представляет слабая изученность и малая производительность технологических операций, необходимых для переработки вторичных полимеров, а именно – качественной сортировки отходов пластиков, очистки и отмывки от нежелательных примесей, измельчения тонкостенных и пленочных изделий, эффективной экструзии сложносоставных композиций, штамповки штучных изделий из листа. Пока не решены вопросы оптимизации технологических параметров процессов рециклинга, обеспечивающих снижение энергоёмкости и материалоёмкости. Совершенствование технических средств переработки вторичных пластиков, материаловедческих подходов к рецептурно-технологическим решениям, контроля параметров выпускаемых изделий, а также формирование оптимальной инфраструктуры соответствующих предприятий, представляют собой актуальную комплексную зада-

чу, решаемую на стыке товароведения и материаловедения. Развитие гибких рециклинговых технологий напрямую связано с созданием сети предприятий технического сервиса и дилерских пунктов, осуществляющих сбор отработанных пластмассовых деталей и изделий. Так, в основных положениях программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021—2025 годы указано, что для использования твердых коммунальных отходов необходимо создать производства по их сортировке и переработке [2].

В Беларуси зарегистрировано порядка 100 организаций по переработке полимерных отходов. Одним из крупнейших предприятий такого типа является ОАО «Белвторполимер» (г. Гродно), где налажен полный цикл переработки отходов (в том числе сильно загрязненных) и производства новых готовых изделий из пластмасс. В настоящее время перерабатываются полиэтилен низкой и высокой плотности (пленка, мешки, тара разных видов, пробки бутылок, колодки обувные, промышленные отходы) и полипропилен (пленка, мешки тканые, тара разных видов, шприцы и т.п.). Схожая структура рециклинга реализуется в КУП «Спецкоммунтранс» (г. Гомель).

Новым направлением в области рециклинга вторичных полимеров может явиться их модифицирование с целью компенсации ухудшения свойств и придания ряда новых ценных характеристик. Представляется, что этот результат может быть достигнут путем сочетания методов целевого термического и физико-химического воздействия на вторичные пластики с целью инициирования в них изменений, желательных с точки зрения совмещения с другими (первичными или вторичными) пластиками. Такие комбинированные полимерные системы могут оказаться новым классом материалов, обладающих комплексом ценных свойств.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» (тема 4.2.2, НИР 2).

1. Статистический сборник. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Минск. 2021 г., с. 195-196.
2. Основные положения проекта программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021-2025 гг., с.20.

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА И ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА, СТАБИЛИЗИРОВАННЫМИ ЭКСТРАКТАМИ *DIMOCARPUS LONGAN*Т.А.Безносик¹, Т.А. Савицкая¹, И.М. Кимленко¹, Ле Тхи Ми Хань², Д.Д. Гриншпан³¹Химический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь,
savitskayaTA@bsu.by²Институт тропических технологий Вьетнамкой академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам,
pham_lan@mail.ru³Учреждение Белорусского государственного университета «НИИ физико-химических проблем», Минск, Беларусь, grinshpan@bsu.by

Одной из глобальных экологических проблем современного мира является накопление в окружающей среде отходов синтетических полимеров, которые не подвергаются интенсивному физико-химическому и биологическому разложению. Несмотря на разнообразие способов утилизации полимерных отходов (сжигание, пиролиз, химическая модификация, захоронение, вторичная переработка), в настоящее время не существует комплексного подхода к их уничтожению без вреда для окружающей среды и значительных экономических затрат. Как вариант решения этой проблемы в центре пристального внимания исследователей и производителей находится создание пленочной упаковки для пищевых продуктов, альтернативной бионеразлагаемой упаковке из синтетических полимеров. При этом несмотря на то, что ассортимент описанных в научной и патентной литературе биоразлагаемых материалов широк и представлен не только природными, но и синтетическими полимерами, поиск новых композиций проводится достаточно интенсивно в направлении функционализации упаковки за счет придания антимикробных и антиоксидантных свойств [1, 2].

Целью работы явилась разработка составов и исследование свойств пленок, полученных из смесей хитозана, деацетилизованного производного природного полимера хитина, и поливинилового спирта, который является синтетическим биоразлагаемым полимером. Для придания пленкам антимикробных и антиоксидантных свойств в состав формовочной композиции были включены растительные экстракты и наночастицы серебра. В качестве растительных экстрактов были использованы экстракты кожуры, мякоти и семян тропического фрукта лонгана *Dimocarpus longan*, принадлежащего к семейству *Sapindaceae*, который является важным субтропическим фруктовым деревом в Юго-Восточной Азии. Соотношение полимеров в формовочных композициях составляло 80 : 20 и 50 : 50 (мас.%), а соотношение воды и водного экстракта растительных добавок — 1,5 : 1 по объему. Золи серебра, синтезированные и стабилизированные с помощью экстрактов лонгана, вводили в формовочные композиции непосредственно перед формованием

пленок. Формование осуществляли на установке MSK-AFA-L800-H Automatic Thick Film Coater (MTI Corporation) методом полива растворов движущейся фильерой на подложку (solvent casting technique).

Дисперсионный анализ полученных золей на приборе ZETASIZER (Nano series) позволил установить, что размер частиц золей, синтезированных с помощью исследованных экстрактов изменяется от 14 до 51 нм. При этом наиболее стабильные золи серебра, имеющие наименьший размер частиц, образовывались в случае использования экстракта семян лонгана (рис. 1), по сравнению с экстрактами из мякоти и скорлупы. Это можно связать с тем, что в этом экстракте содержится наибольшее количество фенольных соединений, таких как корилагин, галловая и эллаговая кислоты.

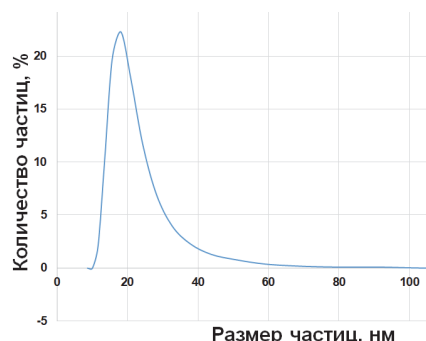


Рис. 1. Распределение по размерам частиц золя серебра, синтезированного с экстракта семян *Dimocarpus longan*

Установлено, что введение экстрактов лонгана и наночастиц серебра увеличивает срок хранения упакованных в пленки фруктов и хлебобулочных изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № X22B-005)

1. Geyer R., Jambeck J., Law K. Production, use, and fate of all plastics ever made // Sci. Advances. — 2017 (3), № 7: e1700782, 5
2. Uliash K.I. Antioxidant and catalytic application of silver nanoparticles using longan seed extract as a reducing and stabilizing agent // J. Photochemistry and Photobiology. — 2016 (164), 344—351.

МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА TiAlN/C ПОКРЫТИЙ

А.Г. Бердиев, Н.Н. Федосенко

УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Гомель, Беларусь; fedosenko@gsu.by

Покрyтия на основе нитридов переходных металлов, также, как и алмазоподобные находят широкое применение в машиностроении и металлообработке. Разработке методов синтеза, исследованию структуры и свойств, а также применению таких многокомпонентных покрyтий посвящено большое количество работ. Формирование покрyтий, сложных как по элементному, так и по стехиометрическому составу, позволяет увеличить температурную стойкость, механические и физические свойства (увеличить твердость, стойкость к абразивному износу, износостойкость при высоких температурах и др.). Такое изменение механических свойств основано на эффекте твердорастворного упрочнения за счет образования химических соединений, отдельных фаз, либо их смесей, как между различными металлами, так и при взаимодействии с неметаллами. При этом свойства многокомпонентных покрyтий зависят также от растворимости элементов в объеме основной матрицы. Например, для TiN покрyтий можно выделить такие элементы, как Al, Si, B с ограниченной растворимостью, что позволит совместно с механизмом твердорастворного упрочнения реализовать дисперсионное упрочнение. Многокомпонентные покрyтия формируют в результате распыления как композиционных мишеней, так и с использованием нескольких независимых испарителей.

Для формирования многокомпонентных нитридных покрyтий широко используются дуговые методы, характеризующиеся высокой стабильностью работы в реактивных процессах, но при этом для них характерно наличие в потоке большого количества капельной компоненты, что существенно снижает качество покрyтия. Известно, что AlTiN покрyтие обладает повышенной эластичностью, что значительно снижает возможность его отслаивания от поверхности инструмента.

В данной работе покрyтия композиционного нитрида титана алюминия (TiAlN) осаждались с применением магнетронной распылительной системы постоянного тока в смеси рабочих (Ar+N) газов и параметров магнетрона ($U = 500$ В, $I = 0,5$ А). Использование композитного Ti-Al катода позволяет сформировать покрyтие с равномерным распределением элементов по толщине слоя за счет высокой степени смешивания плазменных потоков в магнетронном разряде. Слой углерода осаждались с использованием импульсного катодно-дугового разряда ($U_{\text{разряда}} = 350$ В, частота 15 Гц). Поверхностную морфологию изучали методами атомно-силовой микроскопии (Solver 47, NT MDT). Определение механических свойств полученных покрyтий осу-

ществляли с помощью нанотвердомера Наноскан 4D (Россия). Измерения проводили в режиме динамического механического анализа при максимальной нагрузке на индентор 200 мН. Установлено, что поверхностная шероховатость RMS полученных покрyтий зависит от отношения Ar/N рабочих газов (таблица 1).

Таблица 1. Механические свойства осажденных покрyтий

Образец	Расход Ar, мл/мин	Расход N ₂ , мл/мин	Шероховатость RMS, нм	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа
AlTiN/C	45	15	14,6	11,6	228,9
AlTiN/C	50	10	13,3	15,3	256,3
AlTiN/C	55	5	12,5	13,6	244,3

Согласно данным таблицы 1 твердость осажденных слоев определяется влиянием AlTiN/C подслоя, в частности его структурно-фазовым составом. Как показано в работе [1] для TiAlN подслоя наблюдается зависимость твердости и модуля упругости от Ar/N отношения рабочих газов, определяющих процесс формирования нитридной компоненты слоя. При отношении рабочих газов Ar/N равном 50/10 происходит увеличение твердости покрyтий, что связано как с образованием переходного диффузного слоя за счет взаимодействия между титаном и углеродом в покрyтии, так и формированием более мелкозернистой компоненты TiN в сравнении с покрyтиями, полученными при других отношениях рабочих газов. Уменьшение размера зерна подслоя (по данным анализа АСМ изображений) вызывает трансформацию зернограницной структуры, активизирует перестройку неравновесных границ зерен в более равновесное состояние и постепенно снижает количество дефектов, находящихся в объеме покрyтия. Для AlTiN/C покрyтия полученного при расходах рабочих газов Ar/N равном 55/5 наблюдается избыток титана химически не связанным с азотом, который в последствии взаимодействует с углеродом с образованием в диффузионной зоне карбидных соединений, что значительно увеличивает прочность адгезионного соединения между слоями AlTiN и углеродом.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Фотоника и ее применения», (задание 1.12).

1. Механические свойства нитридных покрyтий / А. Г. Бердиев, Н. Н. Федосенко // Материалы научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова, Гомель, 25 июня 2021 года: сборник материалов / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; редкол. : С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф.Скорины, 2021. – С. 304 – 308.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛОВОЛОКОННЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИСУЛЬФОНА

А.В. Бильдюкевич, Т.А. Глевицкая, Е.С. Любимова, Е.А. Назаров, Т.В. Плиско

²Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, plisko.v.tatiana@gmail.com

Цель работы — разработка пористых полволоконных мембран-подложек на основе полисульфона (ПСФ) с наружным селективным слоем, которые могут использоваться в качестве матрицы для получения ассиметричных композиционных мембран для нанофильтрации. Для достижения данной цели необходимо было выбрать оптимальные условия для получения высокопроницаемых полволоконных мембран в непрерывном режиме формования. Было проведено исследование зависимости транспортных свойств мембран и их структуры от параметров формования (давления формовочного раствора ($P_{\text{пол.}}$), давления внутреннего осадителя ($P_{\text{ос.}}$), расстояния от фильеры до зеркала приемной ванны (воздушного зазора) (H)), состава внутреннего осадителя.

Материалы и методы. В качестве мембранообразующего полимера использовали полисульфон (ПСФ) марки Ultrason S 6010 ($M_w = 4,5\text{--}5,5 \times 10^4$ г/моль, BASF, Германия), в качестве растворителя — N,N-диметилацетамид (ДМАА, BASF, Германия, степень чистоты 99,8%), в качестве порообразователя — полиэтиленгликоль ПЭГ-400 ($M_n = 400$ г/моль, BASF, Германия), в качестве гидрофилизирующего агента — поливинилпирролидон ПВП К-90 ($M_n = 3,6 \times 10^5$ г/моль, Fluka).

Половолоконные мембраны с внутренним или наружным селективным слоем получали методом инверсии фаз способом мокрого формования в непрерывном режиме. В качестве внутреннего осадителя использовали воду или смеси ДМАА/вода.

Установлено, что независимо от режимов формования использование воды в качестве внутреннего осадителя приводит к получению полволоконных мембран с внутренним селективным слоем и более пористым и разрыхленным наружным слоем. Матрица мембраны представляет собой губчатую структуру, в которой отсутствуют крупные поры (макроиды). Внутренний диаметр полученных полволоконных мембран составил 650—710 мкм, а толщина стенки 110—198 мкм. Установлено, что при увеличении длины воздушного зазора толщина стенки волокна и внутренний диаметр уменьшаются из-за вытяжки волокна в продольном направлении. Независимо от режимов формования удельная производительность полволоконных мембран по воде составляет 200—300 л·м²/ч.

Для получения полволоконных мембран с селективным слоем на внешней поверхности использовали более «мягкий» внутренний осадитель по отношению к формовочному раствору.

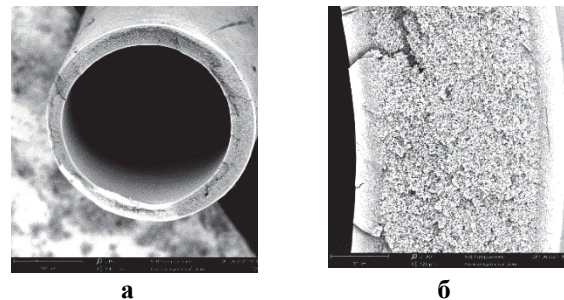


Рис. 1. Структура полволоконных мембран на основе полисульфона с наружным селективным слоем: а – скол поперечного сечения; б – фрагмент скола поперечного сечения при большем увеличении

Использование мягкого внутреннего осадителя приводит к замедлению скорости осаждения полимера на внутренней поверхности полволоконной мембраны и предотвращению образования плотного селективного слоя во время нахождения волокна в воздушном зазоре при формовании. В качестве мягкого внутреннего осадителя использовали смеси ДМАА/вода. Установлено, что при уменьшении длины воздушного зазора с 20 до 0 см наблюдается монотонное увеличение внутреннего диаметра полволоконных мембран с 670 мкм до 733 мкм из-за уменьшения степени вытяжки при формовании мембраны. Толщина стенки волокна при этом уменьшается немонотонно. Минимум толщины стенки наблюдается при длине воздушного зазора 5 см. Установлено, что удельная производительность по воде увеличивается при увеличении длины воздушного зазора и проходит через максимум при длине воздушного зазора 5 см, что наряду с изменением структуры селективного слоя, связано с соответствующим изменением толщины стенки волокна. Показано, что увеличение температуры и давления подачи внутреннего осадителя приводит к существенному увеличению удельной производительности полволоконных мембран по воде. Установлено, что увеличение давления подачи формовочного раствора приводит к существенному увеличению толщины стенки полволоконных мембран и постепенному снижению внутреннего диаметра волокна.

В результате исследования были подобраны оптимальные режимы формования, что позволило получить мембраны с наружным селективным слоем, губчатой структурой стенки волокна и удельной производительностью по воде 500—600 л·м²/ч.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ (№X22КИ-036).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ ПОЛИУРЕТАНОВОКО КОМПОЗИТА С БОРНОЙ КИСЛОТОЙ И С ДИОКСИБЕНЗОЛАМИ

Е.Ю. Бобкова, Л.Н. Василевская, О.О. Гавриленко, Н.А. Шкредова

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь; lab_dozator@mail.ru

Одним наиболее доступных и эффективных способов повышения термостабильности полиуретанов (ПУ) является введение в их состав различных добавок полимерной природы, в том числе, содержащих в своей структуре бор, а также различные фенольные соединения (ФС).

Цель.

Для установления механизма влияния данных добавок на структуру и межмолекулярное взаимодействие в полимерной матрице исследованы ПУ композиты с борной кислотой, и ФС (резорцином, пирокатехином и гидрохиноном).

Материалы и методы исследования.

Композиты получали введением в компонент А (полиэфир) наполнителей в разном процентном соотношении (процент по массе — 0,5%, 1%, 2% от полиэфира), и после образования однородной смеси добавляли компонент В (полиизоцианат). Полученные образцы композитов исследовали методом ИК спектроскопии, с привлечением квантово-химических расчетов, используя теорию функционала плотности (DFT).

Результаты и их обсуждение.

Установлено, что в экспериментальном ИКС для композитов с борной кислотой, введение наполнителя приводит к росту интенсивности длинноволнового крыла широкой полосы в области 1775—1625 см^{-1} , относящейся к валентным колебаниям карбониллов $\nu(\text{C}=\text{O})$ уретановой, амидной, а так же сложной эфирной групп. Кроме того, изменяется контур сложной полосы в области колебаний 1510—1550 см^{-1} , обусловленной поглощением уретановой группы $\nu(\text{амид II})$ и ароматического кольца.

Для объяснения наблюдаемых спектральных изменений, предложены структурные модели фрагментов полимерной цепочки (содержащие бороксиновые кольца или бороксидные группы) и рассчитаны их ИКС. Показано, что в случае образования комплекса через структуру бороксина в ИК спектре наблюдается интенсивная полоса 1415 см^{-1} , относящаяся к колебаниям бороксинового цикла. При образовании комплекса через бороксидную группу данная полоса отсутствует. При этом в обоих случаях наблюдается смещение в длинноволновую область спектра полосы $\nu(\text{C}=\text{O})$ ($\Delta\nu = 60 \text{ см}^{-1}$), ответственной за колебания карбонила полиэфирной группы, расположенной возле атома бора, по отношению к $\nu(\text{C}=\text{O})$ валентного колебания карбонила

уретановой группы. В экспериментальном спектре композита ППУ с борной кислотой наблюдается длинноволновое плечо 1650 см^{-1} только у полосы 1700 см^{-1} , ответственной за $\nu(\text{C}=\text{O})$ карбонила уретановой группы и отсутствуют существенные изменения в области 1350—1410 см^{-1} , характерные для колебаний бороксинового кольца.

В отличие от композитов на основе борной кислоты, в экспериментальных ИКС композитов на основе ФС отсутствуют какие-либо изменения в области колебаний карбонильных групп (1775—1625 см^{-1}). При этом наблюдаются дополнительные полосы в области 1100—1300 см^{-1} . Введение в полиэфир резорцина, пирокатехина и гидрохинона по-разному влияет на ИКС образующихся композитов. В случае пирокатехина и резорцина в ИКС проявляется малоинтенсивная полоса при 1260 см^{-1} , интенсивность которой при увеличении процентного содержания наполнителя увеличивается незначительно. Добавление в компонент А гидрохинона приводит к появлению в спектре полосы при 1179 см^{-1} , интенсивность которой значительно увеличивается в зависимости от процентного содержания наполнителя. Изменения в ИКС в обоих случаях свидетельствуют об отсутствии взаимодействия между карбониллом уретановой группы и наполнителем и могут объясняться присоединением молекул диоксибензолов лишь по $\text{C}=\text{N}$ связи изоцианата, что вероятно вызвано большей прочностью связи $\text{C}=\text{O}$ в изоцианатах по сравнению с азометиновой связью. В силу этого присоединение изоцианатов по связи $\text{C}=\text{O}$ требует преодоления существенно большего барьера свободной энергии, чем по связи $\text{C}=\text{N}$, что подтверждается DFT расчетами при изучении механизма реакций взаимодействия фенилизотиоцианата с линейными ассоциатами метанола, а так же реакций метилизоцианата с мономером фенола и его линейным димерным комплексом с водородной связью [1].

Таким образом, совместный анализ теоретического и экспериментальных спектров композитов ППУ с борной кислотой позволил предположить, что изменения в ИКС могут быть вызваны как образованием сетки водородных связей с участием соединений бора, так и образованием межмолекулярных комплексов с участием бороксидной группы BO_3 . Для композитов на основе ФС наиболее вероятным является присоединение изоцианатов по связи $\text{C}=\text{N}$.

1. А.Я. Самуилов, Л.А. Зенитова, Я.Д. Самуилов, А.И. Коновалов. Квантово-химическое изучение реакций фенилизотиоцианата с линейными ассоциатами метанола // ЖОрХ. — 2009, (45), С 75–80.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ СВЯЗУЮЩЕГО И ВСПЕНИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГОРЮЧЕСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕРМОВСПЕНИВАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Богданова¹, О.И. Кобец¹, А.Б. Перевозникова²

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; kobetsoi@mail.ru

²Белорусский государственный педагогический университет им.М.Танка, Минск, Беларусь

Одним из направлений применения полимерных термовспениваемых композиционных материалов (ТВКМ) является их использование в противопожарных муфтах для образования термоизолирующего барьера, препятствующего распространению пламени по полимерным конструкциям, пересекающим межэтажные перегородки высотных зданий. В результате протекания последовательно-параллельных физико-химических процессов термоллиза основных компонентов, входящих в состав ТВКМ (полимерного связующего, вспенивающих, карбонизирующих агентов, инертных наполнителей), происходит многократное вспучивание материала с образованием изолирующих коксовых структур. Ранее нами установлена зависимость механической прочности, плотности вспененного кокса, термоизолирующей эффективности ТВКМ от природы и содержания компонентов вспенивающей системы и инертных наполнителей, содержания связующего [1]. В данной работе представляло интерес в сопоставительном плане исследовать влияние природы связующего и газоккоксообразующей системы на физико-химические свойства и горючесть ТВКМ.

Цель — исследование влияния природы полимерного термопластичного связующего и состава газоккоксообразующей системы на физико-химические свойства и горючесть термовспениваемых композитов.

Материалы, методы и обсуждение результатов исследования. Для исследования отобраны два композита на основе термопластичных связующих (40 % в составе композита), состоящих из смеси полиолефиновых сополимеров с бутилкаучуком и пластификатором хлорпарафином: в первом случае (таблица, ТВКМ1, ТВКМ2) использовали этиленвинилацетатный сополимер (СЭВА), во втором случае (ТВКМ3, ТВКМ4) — этилен-пропиленовый сополимер марки Вистамакс (ВМ). В качестве вспенивающих и карбонизирующих агентов, представляющих собой газоккоксообразующую систему (ГКС), в рецептурах содержалось 25 % смеси из дигидрофосфата или полифосфата аммония (ДФА или ПФА), гексаметилентетрамина или пентаэритрита (ГМТА или ПЭТ) и минерала доломита (Дл). Кроме того, в рецептуры всех ТВКМ вводили одиноковое количество терморасширяющегося графита и инертных наполнителей (слюды, волластонита) при суммарном их содержании в композите 35 %. Вспени-

вающую способность ТВКМ (коэффициент вспенивания) определяли как отношение объема вспененных продуктов прогрева (500 °С, 10 мин) к исходному объему образца. Вспенивание считали удовлетворительным при $K_v > 10$. Механическую прочность (относительную деформацию сжатия, ϵ , %) тех же продуктов прогрева ТВКМ рассчитывали по изменению высоты пенококка под действием вертикальной нагрузки (82 Па) относительно высоты исходного вспененного слоя. Испытания горючести ТВКМ проводили по ГОСТ 12.1.044 – 89 по приращению температуры ($\Delta t_{\max} < 60$ °С) и потере массы ($\Delta m < 60$ %) при отжиге в пламени горелки (5 мин).

Согласно данным исследования (таблица) установлено, что лучшие показатели по горючести и механической прочности коксового остатка, а также удовлетворительное вспенивание характерны для ТВКМ1 на основе СЭВА и ТВКМ4 на основе ВМ, содержащих определенную ГКС: в случае ТВКМ1 – ДФА, ГМТА, Дл (ГКС1), а в случае ТВКМ4 – ПФА, ПЭТ, Дл (ГКС4).

Таблица. Состав ГКС композитов, физико-механические свойства продуктов прогрева и горючесть ТВКМ

№ ТВКМ, связующее / ГКС	K_v	ϵ , %	Горючесть	
			$\Delta t_{\max}$, °С	Δm , %
1 СЭВА / ДФА, ГМТА, Дл	33,7	10,7	68	53,0
2 СЭВА / ПФА, ПЭТ, Дл	44,9	22,9	107	54,8
3 ВМ / ДФА, ГМТА, Дл	45,4	16,8	76	56,9
4 ВМ / ПФА, ПЭТ, Дл	36,2	8,6	63	58,3

При проведении комплексного термического анализа (ДСК, ТГ, ДТГ) для ГКС1– ГКС4 в сопоставлении с температурными интервалами плавления связующих на основе СЭВА и ВМ показано, что основной причиной лучших результатов по физико-химическим свойствам и горючести для ТВКМ1 и ТВКМ4 в отличие от менее эффективных исследуемых композитов (ТВКМ2 и ТВКМ3) является совместимость температурных интервалов термopевращений соответствующего связующего и ГКС.

Таким образом, при разработке ТВКМ с низкой горючестью важно соблюдать совмещение интервалов термopевращений ГКС и полимерного связующего.

- Богданова В.В., Кобец О.И. Огне-термозащитные свойства термовспениваемых композитов на основе полиолефинов в зависимости от природы и содержания наполнителей // Полимерные материалы и технологии – 2018 (4), № 4, 64–71.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ И ТЕРМООБРАБОТАННОГО ПТФЭ

А.П. Васильев, С.Н. Данилова, А.А. Дьяконов, А.А. Охлопкова

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

Введение. Перспективным направлением при создании полимерных композиционных материалов является совмещение термопластов. Так в работах [1, 2] разработаны триботехнические материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и механоактивированного политетрафторэтиленом (ПТФЭ). При этом авторам удалось реализовать синергетический эффект для улучшения износостойкости и снижения коэффициента трения.

В данной работе приведены результаты исследования совмещения СВМПЭ с термообработанным ПТФЭ. Ранее нами в работе [3] было показано, что при термической обработке ПТФЭ выше температуры плавления его частицы уменьшаются в размерах и формируются в виде глобул. Это привело к улучшению взаимодействия между СВМПЭ и ПТФЭ из-за увеличения удельной поверхности частиц термически обработанного фторопласта.

Цель работы — исследование влияния модифицированного термической обработкой ПТФЭ на триботехнические свойства СВМПЭ.

Материалы и методы. Полимерной матрицей служил СВМПЭ марки GUR-4022 (Celanese, Китай). В качестве наполнителя использовали ПТФЭ марки ПН-90 (ГалоПолимер, Россия). Термообработку ПТФЭ проводили выше температуры плавления (375 °C) и обозначили как «ПТФЭ-ТО». Образцы СВМПЭ и композитов на его основе получали методом горячего прессования.

Триботехнические характеристики СВМПЭ и ПКМ определяли на универсальной испытательной машине UMT-3 (CETR, США). Схема трения «палец-диск». Структурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-7800F (Jeol, Япония).

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены результаты исследования морфологии частиц ПТФЭ методом электронной микроскопии.

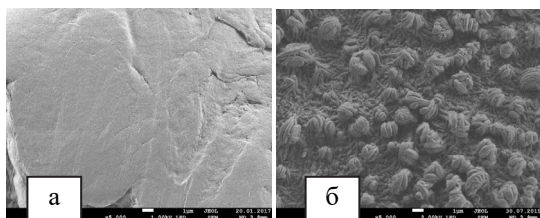


Рис. 1. Морфология поверхности порошка ПТФЭ (×5000): а) исходный ПТФЭ; б) ПТФЭ-ТО

Из рис. 1 видно, что морфология поверхности

ПТФЭ-ТО значительно отличается. Видны структурные образования округлой формы, которые не присущи исходному ПТФЭ. Размеры структурных образований оцениваются в ~2 мкм.

На рис. 2 представлены результаты исследования триботехнических свойств СВМПЭ и композитов.

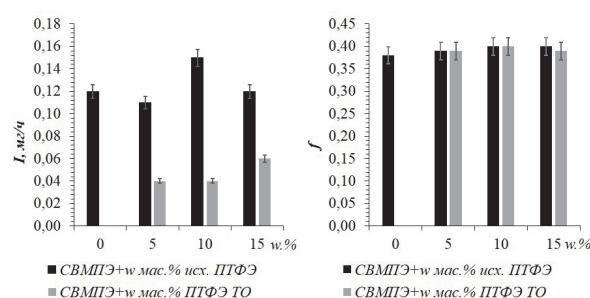


Рис. 2. Триботехнические характеристики: I – скорость массового изнашивания; f – коэффициент трения

Из рис. 2 видно, что у композитов, содержащих исходный ПТФЭ, скорость массового изнашивания сохраняется на уровне ненаполненного СВМПЭ. В случае введения ПТФЭ-ТО в количестве 5–15 мас.% в СВМПЭ зарегистрировано снижение скорости массового изнашивания в 2–4 раза по сравнению с исходной полимерной матрицей. Возможно, улучшение износостойкости связано с лучшим сцеплением частиц СВМПЭ и ПТФЭ-ТО. Коэффициент трения во всех образцах находится на одном уровне и сопоставим по значению с исходным СВМПЭ. Методом ИК-спектроскопии было показано, что в композите СВМПЭ+ПТФЭ-ТО интенсивность пиков, относящихся к кислородсодержащим группам ниже по сравнению с композитами, содержащими исходный фторопласт.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ НИР № FSRG–2020–0017.

1. Panin S. V. et al. Wear resistance of composites based on hybrid UHMWPE–PTFE matrix: mechanical and tribotechnical properties of the matrix // Journal of Friction and Wear. — 2015 (36), №. 3, 249–256
2. Bochkareva S. A. et al. Simulation of UHMWPE composites filled with preliminary mechanically activated PTFE particles // AIP Conference Proceedings. — 2018 (2051), №. 1, 020035
3. Охлопкова А. А. и др. Влияние термической обработки на надмолекулярную структуру порошка политетрафторэтилена // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. — 2016 (54), №. 4, 48–57

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫМ КОМПОЗИТОМ МИКРОКОМПОНЕНТОВ МЕТАЛЛОВ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

В.С. Васильева, Л.Н. Василевская, М.А. Ксенофонтов, В.В. Понарядов, Н.А. Шкредова

НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь, lab_doзатор@mail.ru

Свойства сорбционных материалов в значительной мере определяются природой матрицы сорбента, его функциональных групп, макро- и микроструктурой используемого материала. Пенополиуретаны — пористые сорбенты, гидрофобная полимерная матрица которых содержит различные полярные функциональные группы, что может дать возможность использования их для эффективного поглощения и концентрирования как полярных, так и неполярных молекул.

Экспериментальные образцы пенополиуретанового композита получали из компонентов А и Б. Компонент А представлял собой смесь простых полиэфиров с молекулярной массой 200—6000 и функциональностью от 2 до 4 с низкомолекулярным диолом, катализатором (третичные амины или диметилэтилоэтаноламин) и ПАВом (кремнийорганические неионогенные пеностабилизаторы). Кроме того, к простым полиэфирам добавляли 15-20% сложных полиэфиров. Состав компонента Б представлял смесь дифенилметандиизоцианата и его олигомера на основе 4,41-дифенилметандиизоцианата. В качестве наполнителей использовали моногидроксид алюминия $Al(OH)_3$ и таунит (многослойные пакетированные нанотрубки с преимущественно конической формой графеновых слоев длиной более 2 мкм с наружным диаметром от 15 до 40 нм в виде сыпучего порошка черного цвета). Дисперсный наполнитель, высушенный при температуре 90—100 °С до постоянного веса, добавляли в компонент А, перемешивали с помощью механической мешалки (5000 об/мин) и не включая ее вводили компонент Б. Полученную смесь выливали в форму, в которой происходило вспенивание и отверждение пенополимера. Соотношение компонентов А/Б по массе составляло 1/1.

При оценке эффективности сорбентов большое значение имеют величина сорбционной емкости, время достижения сорбционного равновесия и степень извлечения.

Образцы пенополиуретанового сорбента в виде кубиков (25,0×25,0×10,0 мм) отмывали дистиллированной водой, сушили на воздухе при комнатной температуре и использовали для исследования кинетики закономерностей концентрирования металлов. Подготовленный образец помещали в колонку (рабочий объем 180 см³, высота слоя сорбента составляла 15 см). Водные растворы солей $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ готовили, растворяя в мерных колбах (100 мл) навески солей (с точностью до $\pm 0,0002$ г).

Растворы солей в количестве 50 мл заливали в

колонку с сорбентом и через определенные промежутки времени (15, 30, 45, 60 мин) отбирали пробы, в которых измеряли концентрацию солей на спектрофотометре СФ-26 (рис. 1). Для определения концентрации исследованных катионов в процессе сорбции использовали метод калибровочных графиков.

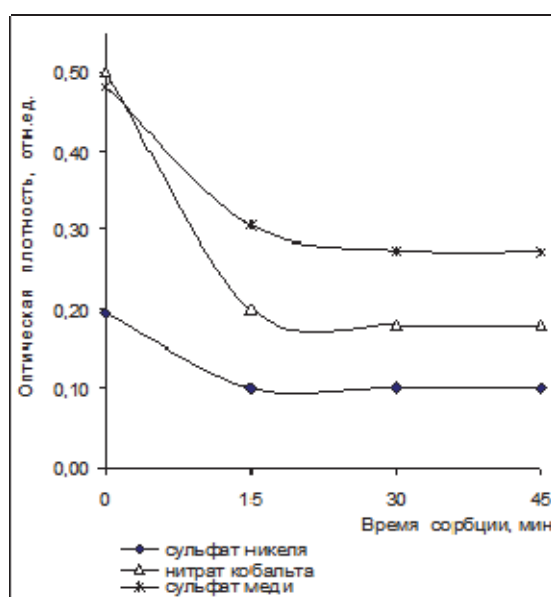


Рис. 1. Кинетика сорбции катионов металлов пенополиуретановым композитом

Установлено, что исследованный пенополиуретан сорбирует из водных растворов катионы Cd^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} с максимальным извлечением ионов в интервале pH = 5—6. В динамических условиях сорбционное равновесие устанавливалось через 15 минут, при исходной концентрации катионов (500—2500 мг/л) сорбционная емкость изменяется в пределах 30—460 мг/г, степень извлечения 23—70%, в статических условиях при исходных концентрациях катионов сорбционное равновесие устанавливается через 60 мин, степень поглощения достигает 100%.

Проведены квантово-химические расчеты электронно-колебательных спектров макромолекул пенополиуретанового композита и определены спектральные критерии их идентификации. Согласно проведенным квантово-химическим расчетам сорбция катионов металлов из водного раствора, вероятно, обусловлена образованием координационных связей ион металла — функциональные группы макромолекул, содержащих атомы кислорода или азота.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОРЕАКЦИОННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ СМЕСЕЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

В.С. Васильева, С.В. Выдумчик, М.А. Ксенофонтов, Т.Г. Павлюкевич, В.В. Понарядов

НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь, lab_doзатор@mail.ru

Переработка высокомолекулярных соединений в изделия и материалы осуществляется, как правило, с использованием высоких температур или давлений, а зачастую сочетанием этих технологических факторов. Осуществление таких методов требует сложной технологической оснастки и энергоемких длительных многостадийных процессов, что в ряде случаев не обеспечивает получение материала с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Авторами теоретически обоснован и впервые на практике реализован одностадийный процесс получения газонаполненных полимеров, в одном технологическом цикле которого происходит поликонденсация, вспенивание и отверждение высокореакционных мономерных композиций.

В работе показано, что сочетание дальнейшего повышения требований к полимерным материалам с возможностью их переработки может быть достигнуто только созданием новых физико-химических и технологических принципов, основанных на формировании не расплавов полимеров, а растворов полифункциональных мономеров и олигомеров или их смесей, способных превращаться в полимеры при атмосферном давлении и комнатных температурах.

Решение указанной проблемы оказалось возможным при использовании в реагирующих системах полифункциональных соединений, способных с высокими скоростями вступать в реакции электрофильного замещения с образованием полимеров пространственного строения, обладающих такой реакционной способностью, которая позволяет переводить жидкую вспененную композицию в вязкотекучее и отвержденное состояние при сохранении в объеме определенной концентрации газоструктурных элементов.

Введение в полимерную матрицу добавок различной химической природы оказывает существенное влияние на макромолекулярную структуру полимеров и позволяет целенаправленно влиять на их свойства.

Технология получения пенополиуретановых композитов с различными модификаторами сопровождается рядом проблем, появляющихся на стадии введения наполнителей в полимеры. Вследствие большой удельной поверхности дисперсные наполнители склонны к образованию агломератов, седиментации и неравномерному распределению их в полимере.

В настоящее время используют три основных способа введения в полимеры различных дисперс-

ных модификаторов: диспергирование наполнителя в растворе с последующим испарением растворителя, смешение полимера с добавками в расплаве, осуществление *IN SITU* совместной полимеризации в присутствии наполнителя. Для квалифицированного выбора и применения эффективных модификаторов необходимы детальные исследования механизма их влияния на физико-химические свойства материала.

Разработаны лабораторные технологии введения наполнителей различной природы и количества в реакционную систему в процессе формирования пенополиуретанового композита, основанные на осуществлении *IN SITU* поликонденсации полиэфирного компонента А (с предварительно введенным наполнителем) и последующем добавлении компонента Б (дифенилметандиизоцианат). В качестве наполнителей были использованы гидроокись алюминия, таунит (многослойные пакетированные нанотрубки с преимущественно конической формой графеновых слоев длиной более 2 мкм с наружным диаметром от 15 до 40 нм в виде сыпучего порошка черного цвета) и резорцин (1,3-диоксибензол, двухатомный фенол в виде мелких кристаллов-хлопьев с небольшим оттенком желтого цвета, обладает высокой реакционной способностью благодаря суммарному влиянию двух гидроксильных групп, является слабой кислотой).

Исследования взаимодействий полимерных систем с дисперсными наполнителями являются основой для прогнозирования и целенаправленного регулирования свойств композита.

При разработке технологии получения пенополиуретановых композитов необходимо учитывать влияние условий введения наполнителя на такие основные технологические параметры как время вспенивания и гелеобразования, вязкость компонентов, что существенно влияет на равномерность распределения наполнителя.

Результаты теоретических исследований структурно-фазовых превращений, происходящих при введении наполнителей в полимерную матрицу, в сочетании с данными экспериментальных исследований позволят сформулировать научно обоснованный подход к прогнозированию и целенаправленному регулированию свойств композита.

Изучены прочностные характеристики образцов полиуретановых композитов с наноразмерными наполнителями различной природы и содержания.

ЭКСТРУДИРУЕМЫЙ АНТИФРИКЦИОННЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

О.В. Гоголева, П.Н. Петрова, А.Л. Федоров, М.Н. Кондаков

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая морозостойкость, ударная прочность, химической стойкость, термическая устойчивость и износостойкость, обладают широким спектром областей применения в машиностроении и медицине. Однако, несмотря на высокие физико-механические свойства СВМПЭ промышленное освоение производства изделий сопряжено с рядом непреодолимых трудностей, связанное с его сверхбольшой молекулярной массой, и сверхвысокой вязкостью, что не позволяет использовать обычные и наиболее эффективные для термопластов методы переработки, такие как экструзия и литье под давлением. Для широкого внедрения и потребления ПКМ на основе СВМПЭ необходимо разрабатывать технические решения без ухудшения эксплуатационных показателей, присущих СВМПЭ, но при этом улучшающие технологические свойства, и возможность переработки изделий методами как литья под давлением, так и экструзией, что значительно расширит область применения этих полимерных материалов, например, в 3D-технологиях для получения деталей и узлов сложной формы [1, 2].

Для получения полимерного композиционного материала были использованы следующие порошки:

- СВМПЭ марки GUR-4113 с молекулярной массой $3,9 \cdot 10^6$ г/моль производства Ticona (Китай);
- полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки ПЭ2НТ11 производства ОАО «Казаньоргсинтез» (Россия);
- стеариновая кислота (СК) с мас. долей не менее 99,30% производства «Компонент-реактив» (Россия);
- наполнитель – «Белум» – углеродное волокно (УВ) марки ЛО-1-12Н/40, на поверхность которых методом плазмохимической обработки нанесён слой фторорганических соединений (ОАО «СветлогорскХимволоконо», Беларусь).

Подбор количественных содержаний исходных компонентов экструдированной полимерной матрицы был установлен экспериментальным путем по критериям повышения износостойкости и значению показателя текучести расплава. Так как все рассмотренные матрицы по значениям ПТР находятся в области показателя, необходимых для экструдированных материалов (0,3—12 г/10 мин), выбор композиции состава 85 мас.% СВМПЭ, 5 мас.% ПЭ, 5 мас.% СК обусловлен по критерию максимального снижения

скорости массового изнашивания, по сравнению с остальными рассмотренными вариантами.

В таблице 1 представлены физико-механические и триботехнические свойства ПКМ на основе выбранной полимерной матрицы, модифицированный 5 мас.% углеродным волокном, полученных методом экструзии.

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики ПКМ

Исследуемый материал	$\epsilon_p, \%$	$\sigma_p, \text{МПа}$	$I, \text{мг/ч}$	f	ПТР, г/10 мин
СВМПЭ + 5 мас.% ПЭНД + 5 мас.% СК	765	30,7	0,2	0,20	4,14
СВМПЭ + 5 мас.% ПЭНД + 5 мас.% СК + 5 мас.% УВ	664	29,5	0,14	0,19	0,30

Примечание: $\epsilon_p, \%$ — относительное удлинение при разрыве; $\sigma_p, \text{МПа}$ — предел прочности при растяжении; $I, \text{мг/ч}$ — скорость массового изнашивания; f — коэффициент трения; ПТР, г/10 мин — показатель текучести расплава.

Установлено, что армирование углеродными волокнами выбранной экструдированной матрицы приводит к снижению скорости массового изнашивания в 1,5 раза при сохранении физико-механических показателей матрицы. Показано, что показатель текучести расплава уменьшается в 14 раз, но остается в области показателя, необходимых для экструдированных материалов.

Таким образом, разработанный состав является эффективным решением, позволяющим получить экструдированные материалы с улучшенными триботехническими показателями, что позволит повысить ресурс работы изделий и расширить их область применения.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9

- Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Буслович Д.Г., Донцов Ю.В. Экструдированные полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2018, Т.19, № 1, 16–23.
- Иерархически армированный гетеромодульный экструдированный твердосмазочный наноккомпозит на основе СВМПЭ и способ его получения.: пат. 2674258 С1 Рос. Федерация.: С.В. Панин, Л.А. Корниенко, Л.Р. Иванова, В.О. Алексенко, Д.Г.Буслович// Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). — № 2018133248; заявл. 20.09.2018; опубл. 06.12.2018, Бюл. № 34.

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ПАР ТРЕНИЯ

А.Х. Джанахмедов¹, М.Я. Джавадов²

¹Азербайджанская Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан; dzhanakhmedov@yahoo.com

²Азербайджанская инженерная академия, Баку, Азербайджан

При анализе состояния пар трения во фрикционных устройствах, близких к равновесию, может быть сформулирована общая теория, основанная на линейных соотношениях (Онсагера и Саксена) применительно к металлическому фрикционному элементу и фрикционной накладке. Для последних равновесное состояние наблюдается для установившейся поверхностной температуры, когда ее градиент становится минимальным. Второе равновесное состояние является термостабилизационным, когда по толщине металлического фрикционного элемента достигается минимальный температурный градиент. Приповерхностный слой фрикционной наклейки при температуре выше допустимой претерпевает деструктивные изменения. С увеличением относительной влажности воздуха в парах трения наблюдается увеличение износа их рабочих поверхностей, вызванного ростом момента трения [1, 2].

Цель работы — обоснование возможности использования неравновесной термодинамики с линейными режимами для выявления электрокинетических явлений в приповерхностных слоях пар трения.

При появлении в трибосистеме возмущения (в виде капель воды или термоокислительной деструкции связующих компонентов полимерных фрикционных материалов при температурах выше допустимой) изменяется тепловое состояние металлических фрикционных элементов. Тепловой режим устойчив, если производная от избыточной энергии по определяющему параметру Π , т.е. температура отрицательна полированной поверхностей фрикционного металлического элемента. Незначительная доля энергии металлического фрикционного элемента расходуется на формирование двойного электрического слоя по схеме «полированная поверхность металлического фрикционного элемента — рабочая поверхность фрикционной наклейки» [1].

Резкое изменение удельных долей теплоты рабочей зоны фрикционной наклейки, которая идет на аккумуляцию теплоты приповерхностного слоя, прослеживается в середине длительного режима испытаний тормоза, после чего темп нагревания стабилизируется и становится равным нижнему уровню приповерхностного слоя наклейки. Объясняется это тем, что в приповерхностном слое наклейки начинается взаимодействие компонентов фрикционных материалов, носящих характер эндотермических реакций. Энергия $\Delta W_{\text{и}}$ должна определяться для трибосистемы в целом, с учетом всех влияющих процессов (нагревания, охлаждения, радиационного тепло-

обмена и термохимической деструкции связующих компонентов фрикционного материала), затем с помощью критерия устойчивости ($K < 0$) производится оценка энергосистемы с привлечением токов электризации в парах «приповерхностный слой накладок — рабочие поверхности накладок» (и взаимодействующие с металлическим фрикционным элементом) и «рабочие поверхности накладок — металлический фрикционный элемент», соединенных между собой ионизированной газовой смесью и десорбцией влаги. Инверсия токов осуществляется в обратном направлении, т.е. происходит изменение знака токов электризации [3].

Электрокинетические явления соответствуют взаимодействию между микроэлектрическим током и потоком жидкости, попадающей в сопряжения пар трения. Рассмотрены две части фрикционной наклейки, разделенные пористой перегородкой. Если между двумя частями наклейки приложено напряжение V , то ток течет до тех пор, пока разность давлений Δp не примет стационарного значения.

Обсуждение результатов. Исследования неравновесной термодинамики с линейными режимами в трибосопряжениях пар трения на основе соотношения взаимности и принципов симметрии позволили установить, что происходит протекание электрокинетических явлений в приповерхностном слое полимерной наклейки. Определен потенциал течения жидкости и образующего при этом электрического тока, а также эффект электроосмоса и давления жидкости. Предложен алгоритм неравновесной термодинамики, который содержит теплопроводность и термоэлектрические явления в немассивном металлическом фрикционном элементе и электрокинетические явления в приповерхностных слоях полимерной наклейки. Сформированы соотношения, которые равны соотношениям Онсагера и Саксена, что позволяет определять параметры расчетным путем.

1. Трибология: трение, износ, смазка / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, К. Т. Набизаде, М. Я. Джавадов, Д. А. Вольченко // Баку: «Апостроф - А», 2019. — 640 с.
2. Журавлев Д.Ю. Термодинамический предел поверхностных слоев полимерных накладок при фрикционном взаимодействии // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — Харьков, 2014, №2/11. С. 20–26.
3. Джанахмедов А.Х., Вольченко Д.А., Журавлев Д.Ю. и др. Неравновесная термодинамика с линейными режимами в трибосопряжениях. // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Т.14, №2, 2022, с.18-28.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В.Д. Джафаров, М.А. Манафов, С.А. Бекташи, Г.Г. Мусаева, М.Д. Раджабова,
С.М. Халилова

Институт полимерных материалов Национальной академии наук Азербайджана, г. Сумгайыт, ул. Самеда
Вургуня 124, AZ 5000

Современный научно-технический прогресс сделал возможным широкое промышленное применение различных классов полимерных и полимерных композиционных материалов, к приоритетным представителям которых относятся полиэтилен низкого, среднего и высокого давления. Интерес к полиэтилену объясняется его доступностью, дешевизной и целым рядом высоких эксплуатационных показателей [1, 2]. Поэтому на одном из первых мест в химии и технологии полимерных композиционных материалов стоит проблема создания путем модификации новых классов ПКМ с комплексом ценных свойств. Создание ПКМ на основе ПЭВД с заданным сочетанием свойств, к которым относятся повышенная прочность, высокая термостойкость, низкая себестоимость и т.д., наиболее легко достигается получением наполненных полимерных материалов, компоненты которых при совместной переработке способны оказывать синергический эффект [3, 4]. Для получения композитных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками в перерабатываемую массу добавляли соответствующие модификаторы — стабилизаторы, пластификаторы, аппреты и др. добавки. Для решения необходимого ряда технических задач в последнее время развивается освоение технологии получения перспективных наполненных полимерных композиционных материалов.

Цель работы. Получение композиций на основе полиэтилена высокого давления с минеральными наполнителями (α -кварц-альбит) с улучшенными эксплуатационными показателями

Данная статья посвящена исследованию наполненных полимерных композиций на основе полиэтилена высокого давления производства завода этилен - полиэтилен Сумгаитского промрегиона. В качестве наполнителя использованы α -кварц-альбит из месторождения «Джейран-чол» Товузского региона республики Азербайджан.

Наполнитель α -кварц-альбит имеет следующий химический состав:

Na₂O – 2,96 ZrO₂ – 0,02 MgO – 1,51 Al₂O₃ – 13,66
SiO₂ – 63,75 P₂O₃ – 0,12 SO₃ – 0,17 K₂O – 3,26
CaO – 3,77 TiO₂ – 0,53 MnO – 0,23 Fe₂O₃ – 4,24
ПВТ – 5,65

Минералогический состав α -кварц-альбит имеет следующий групп минералы %

SiO₂(α -кварц-альбит) – 34
Ca,Mg(CO₃) (Калсит Магнезит) – 10
Na(AlSi₃O₃) (Альбит) – 30
Каолинит – 15, Иллит – 7 Fe₂O₃ (Гематит) – 4

Полученные результаты приведены в таблице.

Таблица 1 Физико-механические свойства полученной композиции

Состав композиции, %	Прочность на разрыв, МПа	Относительное удлинение, %
ПЭ-100%	10,1	660
ПЭ: Н=80:20	10,5	140
ПЭ: Н=70:30	10,8	125
ПЭ: Н=60:40	11,8	83
ПЭ: Н=50:50	12,8	54
ПЭ: Н=40:60	13,6	30
ПЭ: Н=30:70	14,7	21

*наполнитель α - кварц-альбит

Размер частиц — 160 мкм, ПЭВД марки-15803-020

Из представленных в таблице данных видно, что максимальная величина прочности на разрыв достигается при введении в состав полиэтиленовой композиции α -кварц-альбита в количестве 70 мас.%, что объясняется при данном соотношении компонентов созданием более однородной (гомогенной) массы композиции. Наполнение матрицы наполнителем более 70 мас.% способствует возникновению хрупкости и уменьшению прочности композиции. Обобщая результаты представленного исследования, можно сделать вывод о том, что содержание наполнителя влияет на деформационные прочностные показатели данных композиций.

Полученные полиэтиленовые композиции могут использоваться в различных отраслях техники в качестве конструкционных материалов технического назначения.

1. Под ред. Кац Г.с., Милетский В. Наполнители для полимерных композиционных материалов. М., Химия, 1981, 736 с.
2. Липатов Ю.С. Физико-химия наполненных полимеров, Киев: Науково Думка, 1976, 233 с.
3. Молчанов Ю.М. Физические и механические свойства полиэтилена, полипропилена и полиизобутилена. Рига: Знание 1966, 439 с.
4. V.D.Dzafarov., E.T.Huseinov., A.A. Efendiev. Influence of particle size and filler concentration on some characteristics of high-pressure polyethylene. Compounds and materials with specific properties conference, 2008, p/ 113-118, New-York.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян

Национальный Политехнический Университет, Ереван, Армения; ars.karapetyan56@mail.ru

Анализ трибологических испытаний композитов на полимерной основе с использованием местных полезных ископаемых в зависимости от условий эксплуатации и состояния поверхности с помощью статистических математических методов, а также изучение трибологических исследований этих материалов с целью создания металлополимерных узлов трения представляют большой научный интерес [1—3].

Цель. Настоящая работа посвящена исследованию процесса трения и изнашивания антифрикционных композиционных материалов на полимерной основе, а также изучению влияния природы и количества местных наполнителей на улучшение трибологических свойств композитов в условиях трения без смазки.

Материалы и методы. С целью разработки композиционных материалов с низким коэффициентом трения и минимальной интенсивностью изнашивания были проведены трибологические испытания в зависимости от изменения значений содержания молибденового концентрата (МК) и политетрафторэтилена (ПТФЭ), условий эксплуатации (скорости и нагрузки), а также шероховатости сопрягаемых поверхностей. Путем проведения небольшого количества трибологических экспериментов (9 опытов) статистический метод Taguchi на основе математического аппарата позволил сделать оптимальный выбор композиционных материалов на полимерной основе с использованием местного минерала. Были рассмотрены 4 параметра и 3 уровня для каждого параметра, данные 9 экспериментов представлены в виде матрицы $L_9(3^4)$.

Трибологические свойства разработанных материалов оценивались на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал-частичный вкладыш» при скоростях 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 контртела — диск 50×14 мм, изготовленный из стали 45 (55—60 HRC) с шероховатостью $R_a = 0.06—0.14$ мкм. Наполнитель измельчали до грануляции 12—40 мкм, содержание его в композитах изменяли в пределах 5, 10, 17 вес.%. В ходе испытаний фиксировались значения коэффициента трения, износа и скорости скольжения.

Результаты и их обсуждение. На основе анализа результатов трибологических испытаний методом Taguchi был сделан обоснованный выбор композиционного материала с минимальными значениями коэффициента трения и износа в зависимости от условий эксплуатации.

Результаты экспериментов показали, что минимальный износ наблюдался в композите на основе ПФС с содержанием 17 вес.% МК и 10 вес.% ПТФЭ при скорости скольжения 1,5 м/с и шероховатости 0,1 мкм R_a . Минимальное значение износа составило $0,024 \text{ мм}^3/\text{км}$, тогда как износ исходного ПФС без наполнителей при установившемся трении составлял $0,29 \text{ мм}^3/\text{км}$. Среднее значение коэффициента трения разработанного композита составило 0,31 при значении коэффициента трения исходного ПФС — 0,48. Значения коэффициента трения для всех композитов при установившемся режиме трения колебались в пределах $0,3 \pm 0,03$. Как показали результаты исследования, разработанные композиционные материалы обладают достаточно стабильными трибологическими свойствами в условиях исследованных нагрузок и скоростей, что объясняется в основном образованием на поверхностях трения гладких, монолитных пленок фрикционного переноса.

Заключение. Использование в качестве наполнителей МК и ПТФЭ способствует значительному улучшению антифрикционных свойств и повышению износостойкости самосмазывающегося композита на основе ПФС. Изучение влияния природы и количества минеральных наполнителей на износостойкость самосмазывающихся композитов на полимерной основе, а также его антифрикционные свойства позволило сделать обоснованный выбор композитов с минимальными показателями износа. Практически полученные композиционные материалы могут быть использованы в металлополимерных трибосопряжениях в условиях трения без смазки.

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 2022 г. при финансовой поддержке ГКН МОН РА.

1. Pogolian A., Bahadur S., Hovhannisyan K. and Karapetyan A. Investigation of the tribochemical and Physico-mechanical Processes in Sliding of Mineral-filled formaldehyde Copolymer Composites Against Steel // *Wear*. – 2006 (**260**), 662–668
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**), N5, 27–42
3. Меликсетян Н.Г., Карапетян А.Н., Сароян В.В., Оганесян К.В. Фрикционные и смазочные материалы с минеральными компонентами // *Трение и износ*. – 2021 (**42**), №1, 89–113

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

И.М. Кимленко¹, Р.Р. Мохаммад¹, М.Б. Новицкая¹,
Н.А. Мелеховец², Я.А. Косенок³, В.Е. Гайшун³

¹Химический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, kimlenka@bsu.by

²Учреждение Белорусского государственного университета «НИИ физико-химических проблем», Минск, Беларусь, melekhovets,na@gmail.com

³Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Гомель, Беларусь, ygaishun@gsu.by

В настоящее время интерес к системам на основе кремнезема не ослабевает, что проявляется в разработке на его основе новых материалов, обладающих уникальными свойствами. Одним из основных потребителей кремнезема является электронная промышленность, в частности, он применяется в составе полирующих композиций для обработки пластин монокристаллического кремния. Наиболее распространенным методом получения гидрозолей на основе диоксида кремния является метод ионного обмена с использованием различных ионообменных материалов [1, 2]. В этой связи особый интерес представляют природные целлюлозосодержащие материалы, которые характеризуются возобновляемостью, невысокой стоимостью, хорошими емкостными характеристиками, возможностью утилизации и регенерации, что делают их использование в промышленности экономически целесообразным. При этом фосфоросодержащие производные целлюлозы, обладая гидрофильностью, а в ряде случаев высокой селективностью ионообменного действия, имеют значение для получения волокон с катионообменными и комплексообразующими свойствами [3].

Целью работы явилась химическая модификация целлюлозы и изучение возможности ее использования для получения коллоидных композиций на основе диоксида кремния. Фосфорилирование предварительно измельченной хвойной целлюлозы проводили в соответствии с методикой [3]. Структуру нативной и модифицированной целлюлозы изучали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Jenna в поляризованном свете при увеличении 320х. Определение обменной емкости полученного ионообменного материала проводили с использованием ионного хроматографа Metrohm 850 Professional IC. Образование золей, полученных с помощью модифицированной целлюлозы, контролировали по наличию конуса Тиндаля, а их устойчивость – турбидиметрическим методом. Определение размеров частиц полученных золей проводили методом лазерной дифракции с помощью лазерного анализатора размеров частиц Mastersizer 3000 (Malvern Instruments Ltd, Великобритания).

Результаты исследования свидетельствуют о

высокой обменной емкости модифицированной целлюлозы и сохранении ее волокнистой структуры с толщиной волокна 12,6 мкм после химической модификации. Методом сканирующей электронной микроскопии при последовательно возрастающем коэффициенте увеличения исследована микроструктура поверхностей ксерогелей SiO₂, образованных из золей, полученных с помощью модифицированной целлюлозы. Установлено, что размер частиц не превышает 500 нм (рис. 1), что совпадает с результатами анализа, полученными с помощью метода лазерной дифракции, хотя встречаются и крупные агрегаты частиц (свыше 20 мкм).

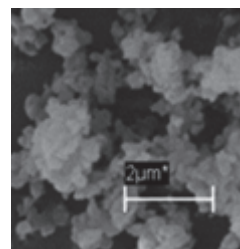


Рис. 1. Микроструктура поверхности ксерогеля SiO₂ (увеличение ×10000)

Таким образом, в результате работы проведена химическая модификация хвойной целлюлозы и показана перспективность ее использования для получения коллоидных композиций на основе диоксида кремния.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоргхимия» (рег. № НИР 20211554)

1. Кудрявцев П. Г. Методы синтеза, свойства и применения кремнезелей для получения композиционных материалов Часть 1 // Инженерный Вестник Дона. — 2018 (3) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5099
2. Савицкая Т. А. и др. Стабилизация гидрофобизирующих эмульсий на основе полиметилсилоксановой жидкости гидроксиэтилцеллюлозой и диоксидом кремния // Свиридовские чтения. — 2019 (15), 147–156.
3. Елатонцев Д. А., Мухачев А. П. Синтез и свойства ионообменников на основе недревесной целлюлозы // Изв. вузов. Химия и химическая технология. — 2020 (63), № 11, 88–95.

ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ В ПОЛИМЕРНЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ

В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин², И.В. Лавров²,
А.П. Сычев^{1,3}, А.А. Сычев¹, В.Б. Яковлев^{2,4}

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

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград, Россия

³ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН», Ростов-на-Дону, Россия; alekc_sap@mail.ru

⁴Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

Цель

Целью работы является построение модели и проведение численных модельных расчетов значений объемной плотности энергии деформации (ОПЭД) в полимерных фрикционных композитах (ПФК) с учетом состава, формы, ориентации и концентрации их компонентов.

Материалы и методы

Рассматривались трибокомпозиты с включениями трех типов. Тип 1 – равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения каучука. Тип 2 – короткие волокна бесщелочного стекла (БЩС), ориентированные в семи различных направлениях относительно прямоугольной системы координат и моделирующие их хаотическое распределение в пространстве композита, а именно: параллельно координатным осям (три направления) и параллельно прямым, образующим равные углы со всеми осями (четыре направления). Полагалось, что объемные доли волокон БЩС в каждом из семи указанных направлений одинаковы. Тип 3 – равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения минерального порошка, состоящего из поликристаллов глинозема, графита и барита, взятых в отношении 1 : 1 : 1 (по объему). В качестве матрицы – компонент 4-го типа – рассматривалась эпоксифенольная смола.

Моделирование значений ОПЭД $E(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r}$ – радиус-вектор случайной точки среды) в отдельных элементах неоднородности трибокомпозитов опиралось на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей и понятие тензора концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ (тензор 4-го ранга) [1, 2]:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} s_{ijkl}(\mathbf{r}) K_{klmn}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{mn}(\mathbf{r}) \rangle K_{ijpq}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{pq}(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

где $\mathbf{s}(\mathbf{r})$ и $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})$ – соответственно тензоры податливости и напряжений, $\langle \bullet \rangle$ – процедура статистического усреднения (по объему).

С помощью соотношения (1) для ПФК рассматриваемой структуры проведено исследование влияния объемных долей v_s , $s = 1, 2, 3, 4$, элементов неоднородности на значения ОПЭД в полимерной матрице и во включениях (всех типов и ориентаций) при одноосном сжатии вдоль оси z при $\langle \sigma \rangle = 1$ МПа.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты численных модельных расчетов значений ОПЭД.

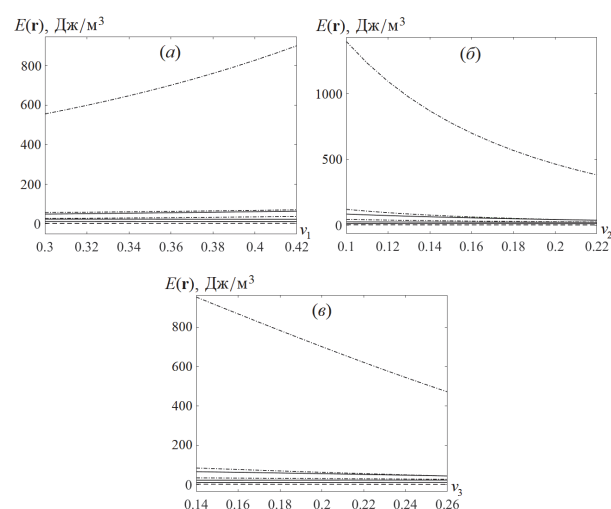


Рис. 1. Значения ОПЭД в элементах неоднородности ПФК при изменении объемных долей включений v_s ($s = 1, 2, 3$): (а) – $v_2 = 0.16$, $v_3 = 0.2$; (б) – $v_1 = 0.36$, $v_3 = 0.2$; (е) – $v_1 = 0.36$, $v_2 = 0.16$

Моделирование показало, что увеличение концентрации дисперсных включений каучука v_1 приводит к росту значений ОПЭД, а увеличение концентраций как волокон БЩС v_2 , так и минерального порошка v_3 приводит, наоборот, к снижению значений $E(\mathbf{r})$ во всех элементах неоднородности ПФК. Наибольшие значения $E(\mathbf{r})$ достигаются в волокнах БЩС, ориентированных вдоль оси z (штрихпунктирные кривые на рис. 1, расположенные выше остальных линий). В остальных компонентах ПФК значения $E(\mathbf{r})$ на порядок меньше, чем в волокнах БЩС, параллельных направлению внешней приложенной нагрузки $\langle \sigma \rangle$, и отличаются друг от друга незначительно. Это согласуется с априорными представлениями об изменениях в распределении значений ОПЭД в элементах неоднородности ПФК.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ гр. проекта АААА-А16-116012610052-3).

1. Шермергор Т. Д. Теория упругости микрон неоднородных 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

СТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ZNAl30, СФОРМИРОВАННОГО ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ

А.И. Комаров, Д.В. Орда, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

Имеющиеся данные [1, 2] указывают на то, что сплавы ZnAl30, в монолитном состоянии, обладают достаточно высокой прочностью в сочетании с высокими триботехническими свойствами, не уступающими бронзам. Поэтому, представляет интерес исследование структуры и триботехнических свойства сплава ZnAl30 в виде покрытия, полученного центробежной индукционной наплавкой на внутреннюю поверхность заготовки, что и являлось **целью работы**.

Материалы и методы. Формирование покрытия на внутренней поверхности заготовки из стали 20, проводилось методом центробежного формования предварительно подготовленной шихты с индукционным нагревом до температуры 760—780 °C и изотермической выдержкой при данной температуре в течение 5 мин. Частота вращения заготовки составляла 1750 мин⁻¹ [3].

Триботехнические испытания проводили на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца относительно неподвижного стального контртела при нагрузках 40, 80 и 120 Н. Амплитуда движения составляла 10 мм, а частота — 10 Гц.

Результаты и их обсуждение. Металлографический анализ показал, что структура наплавленного покрытия имеет градиентное строение за счет оттеснения более тяжелого цинка и растворенного в процессе наплавки железа к стальной основе, а алюминия к поверхности. В результате, покрытие имеет следующее строение: у стальной основы локализован плотный слой на основе цинка, затем переходная зона, насыщенная крупными железосодержащими включениями, и непосредственно слой покрытия (рис. 1, а).

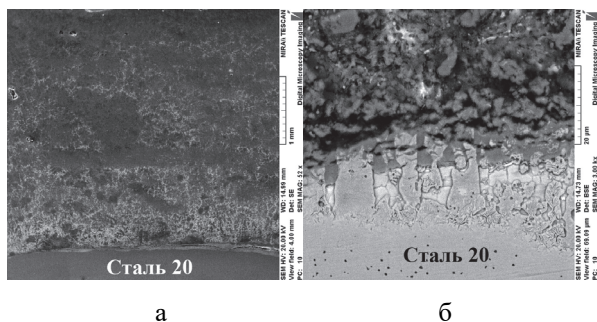


Рис. 1. Структура покрытия из сплава ZnAl30 (а) и диффузионного слоя на стали (б)

Следует отметить, что на поверхности стальной втулки формируется диффузионный цинковый слой, толщиной до 100 мкм, содержащий до 50 мас.% железа. Структура слоя представлена зернами двух типов (рис. 1, б): столбчатыми зернами Fe, насыщенными Zn (24—46%), между которыми располагаются зерна цинкового сплава, содержащего 27—34% Fe. Переходная зона (600—700 мкм) состоит из зерен систем Al-Fe и Al-Fe-Zn, между которыми располагаются зерна Zn-Al сплава, при этом доля Fe в данной зоне достигает 25%.

Основной слой покрытия формируется из сплава следующего состава: Al (55—65%) — Zn (20—25%) — Fe (15—20%). Структура слоя представлена зернами Al-Zn сплава с включениями Al-Fe. На поверхности преобладают крупные включения с размером частиц до 100 мкм, по мере углубления их размер снижается до 20-30 мкм вблизи переходного слоя. Анализ триботехнических свойств покрытия представлен в табл. 1.

Таблица 1. Триботехнические свойства покрытия ZnAl30

Покрытие ZnAl30	Нагрузка, Н		
	40	80	120
Коэффициент трения	0,025-0,028	0,043-0,044	0,048-0,059
Суммарный линейный износ, 10 ⁻³ мкм/м	0,6	3,8	4,9

Выводы. Анализ структуры покрытия показал, что в процессе наплавки Zn-Al сплавов, под действием центробежных сил, цинк ликвирует к стальной основе, формируя диффузионный слой, при этом идет активное растворение стальной основы, что приводит к насыщению расплава железом. Диффузия железа в расплав приводит к формированию интерметаллидных включений на основе систем Al-Fe и Al-Fe-Zn, которые выступают в качестве основной армирующей составляющей. При этом покрытие обладает хорошими триботехническими свойствами при нагрузках до 40Н (5 МПа).

- ГОСТ 25140-93 Сплавы цинковые литейные. Марки. официальное издание М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009250>.
- Рудницкий Ф.И., Курбатов М.И. Перспективы применения цинковых антифрикционных сплавов взамен бронз для изготовления тяжело-нагруженных вкладышей подшипников // Литье и металлургия — 2008, №2 (46), 51-55.
- Способ нанесения двухслойного покрытия на внутреннюю поверхность детали: пат. ВУ №23365 / М.А. Белоцерковский, А.И. Комаров, И.А. Сосновский, Д.В. Орда, А.А. Куриленок, Д.О. Искандарова. — Опубл. 30.04.2021г.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАНЕСЕННОГО МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ

А.И. Комаров¹, А.С. Романюк²

¹Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск Беларусь, al_kom@tut.by

Введение. Микродуговое оксидирование (МДО) алюминиевых сплавов позволяет получать покрытие, содержащее, помимо оксида алюминия, оксиды других металлов. Достигается это за счет добавления дисперсных оксидов в состав электролита. Однако такой метод не обеспечивает равномерного распределения модифицирующего оксида по толщине покрытия. В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработан способ, основанный на МДО предварительно нанесенного алюминиевого слоя, содержащего эти оксиды [1]. В частности, это позволило эффективно и равномерно модифицировать алюмооксидное покрытие диоксидом циркония с контролируемым содержанием ZrO_2 в покрытии (Рис. 1). Следует отметить, что в этом случае оксид циркония кристаллизуется в тетрагональной модификации, что существенно упрочняет покрытие. При этом t-ZrO_2 и стабилизируется самой алюмооксидной матрицей без дополнительного использования оксидов-стабилизаторов.

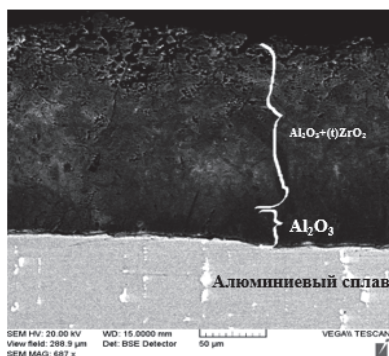


Рис. 1. Структура модифицированного покрытия

Обладая высокой трещиностойкостью и низкой теплопроводностью, ZrO_2 позволяет получать керамические покрытия, работающие в условиях повышенных динамических и тепловых нагрузок. В этой связи представляет интерес исследование адгезионной прочности модифицированного ZrO_2 покрытия, в том числе при циклическом термическом воздействии (ЦТВ).

Методика исследования. Адгезионная прочность определялась методом склерометрии в соответствии со стандартом ASTM C1624-05 [2] на универсальном автоматизированном трибометре MFT-5000 производства Rtec Instruments (США) и рассчитывалась по формуле:

$$HG = \frac{N_{\text{кр}}^{\text{кр}}}{0,5 \cdot F_{\text{бок}}} = \frac{2N_{\text{кр}}^{\text{кр}}}{\pi b^2} \quad (1)$$

где HG — адгезионная (когезионная) прочность, МПа; $N_{\text{кр}}^{\text{кр}}$ — критическая нагрузка, вызывающая появление трещин, Н; $F_{\text{бок}}$ — площадь боковой поверхности индентора, контактирующей со слоем; b — полуширина следа индентора при нагрузке.

Результаты и их обсуждение. Полученные результаты показали, что прочность сцепления покрытия с основой достаточно высока и составляет в среднем 3,49 ГПа. При этом, даже после 10 циклов испытаний при температуре 300 °С прочность сцепления снижается очень незначительно (Таблица 1), что указывает на высокую стабильность полученного композиционного покрытия. Об этом также свидетельствуют результаты рентгенофазового анализа, согласно которым не происходит деградация фазового состава покрытия и оксид циркония сохраняется в тетрагональной модификации.

Таблица 1. Значение адгезионной прочности для сплава АК12М2МгН

Режимы ЦТВ	Ширина трека в момент отрыва, мкм	Нагрузка при которой происходит отрыв, Н	Значение адгезионной прочности, ГПа
до ЦТВ	240,97	75	3,49
ЦТВ до 150°С	239,76	59,7	2,64
ЦТВ до 300°С	195,18	50,1	2,4

Заключение. Полученные результаты указывают на перспективность использования синтезированного композиционного покрытия в экстремальных условиях, в частности для защиты поршней высокофорсированных ДВС.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (по договору № Т21РМ-042).

1. Способ получения композиционного покрытия на вентильном металле или сплаве: заявка BY 20200260 / А. И. Комаров, А.С.Романюк, П.С. Золотая – Оpubл. 16.09.2020.
2. ASTM International, Standard C1624 (C1624-05): Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, Conshohocken, 2005.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГАЗОТРАНСПОРТНОМ ОБОРУДОВАНИИ

В.Г. Копченков, Е.А. Чеботарев, В.С. Мякишев

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия; kopchenkov2@rambler.ru

Введение. Очистка газа от механических примесей и жидкости перед подачей в газовую магистраль регламентируется требованиями государственных стандартов. В настоящее время в качестве первой ступени очистки широко применяют циклонные пылеуловители. Однако вследствие износа уже через 20—25 суток производительность снижается на 6—8% и, соответственно, качественные показатели.

В определённых условиях эксплуатации наиболее эффективным оказался метод гуммирования — футерование резиной деталей машин, подвергающихся ударному воздействию твёрдых частиц [1,2].

Постановка задачи. Изнашивание можно рассматривать как суммарный результат единичных актов разрушения. Разрушение вязкоупругих материалов является весьма сложным процессом и в настоящее время не существует общепринятой теории разрушения. Поэтому возникает необходимость рассмотрения физических основ, обуславливающих разрушение резины и ее износ.

Цель работы. Создание теоретической структурной, а на ее основе математической модели, позволяющей использовать инженерный подход к прогнозированию интенсивности изнашивания эластомеров и их срока службы.

Обсуждение теоретических основ. Проведён анализ теорий разрушения эластомеров [3, 4]. А также изменений, происходящие в структурно-детерминированных объемах эластомера под внешним воздействием, что позволяет сформулировать процесс разрушения резин на мезоуровне и предложить структурную модель разрушения эластомера, лежащую в основе математической модели изнашивания.

Мезообъемы воспринимающие деформации неоднородны. Не все элементы представляют собой подвижные сегменты одинаковой длины и ориентации. Поэтому некоторые из них оказываются более растянуты и движутся быстрее, чем соседние. В результате, даже однородная макродеформация приводит к неравным локальным деформациям и движениям. Вследствие неаффинной деформации происходит разрушение нескольких цепей, а при увеличении деформации и всей пряди. Цепи дополнительно ослабляются термохимическими и термофлуктуационными процессами. Результатом является возникновение в объеме разрушения большого количества субмикротрещин, а также пластическое течение материала.

Скорость развития трещины является следствием нескольких конкурирующих процессов. С одной стороны, высокий уровень диссипации замедляет рост трещины. С другой стороны, диссипация через увеличение внутренней энергии и темпе-

ратуры способствует снижению энергии разрыва межмолекулярных химических и физических связей и ускорению роста трещины.

Разработка математической модели. Основной постулат энергетического подхода к математическому моделированию интенсивности изнашивания заключается в том, что износ является следствием подвода энергии к материалу через внешнее механическое взаимодействие объектов [1]. Поэтому интенсивность изнашивания пропорциональна величине подводимой энергии.

$$J_w = K \cdot W_0, \quad (1)$$

где J_w — энергетическая интенсивность изнашивания, K — коэффициент пропорциональности, W_0 — кинетическая энергия внешнего воздействия.

После раскрытия физического смысла базовых параметров исходного уравнения получено выражение

$$J_w = \frac{\chi \cdot k_p \cdot k_x \cdot W_0}{w_R}, \quad (13)$$

где χ — коэффициент механических потерь [1], k_p — коэффициент эффективности действия энергии при ударе, k_x — коэффициент, учитывающий изменение усталостно-прочностных свойств под воздействием немеханических факторов, w_R — критическая плотность энергии разрушения.

Результаты. Из математической модели следует, что интенсивность изнашивания возрастает при увеличении: механических потерь в резине, вероятности разрыва молекулярных цепей, химической активности резины, глубины развития трещины, кинетической энергии частицы, уменьшении энергии разрыва и радиуса вершины трещины.

Можно отметить и физический смысл энергетической интенсивности изнашивания, показывающий во сколько раз критическая плотность энергии разрушения превышает фактическую плотность поглощенной энергии для конкретных условий эксплуатации.

1. Пенкин Н. С. Копченков В. Г. Сербин В. М и др. Гуммированные детали машин. — М.: Машиностроение. — 2013.
2. Slikkerveer P. J., Dongen V., and Touwslager F. J. Erosion of Elastomeric Protective Coatings // Wear. — 1999 (236), nos. 189—198
3. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров. — М.: Химия. — 1971
4. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа, 2003. - 390с.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ХРОМИСТОМ ЧУГУНЕ НА СТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Г.П. Короткин¹, А.Г. Анисович², П.Ю. Дувалов¹

¹ГНУ «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев, Беларусь; lcti@yandex.by

²ГНУ «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

Постановка задачи. В рабочих органах центробежного дробильно-размольного оборудования (ДРО) широко используются детали из износостойких хромистых чугунов, которые работают в условиях интенсивного абразивного воздействия. К таким деталям предъявляется ряд требований, главными из которых являются износостойкость и высокая твердость.

Для центробежных мельниц производства ОДО «Ламел-777» на опытно-производственном участке ИТМ НАН Беларуси из износостойкого хромистого чугуна ИЧХ18ВМ изготавливается деталь «Башмак ИМ4.04.003-06(07)», выполняющая роль ударного элемента.

По результатам проведения выходного контроля качества была исключена из поставки деталь с низкой твердостью (43,6 HRC). Для определения и устранения причины этого, а также с целью дальнейшего совершенствования химического состава и способов литья решено провести исследование. За эталон была взята вторая такая же деталь из другой партии с твердостью, попадающей в допуск.

Методы исследования. Химический состав образцов, полученных из детали «Башмак ИМ4.04.003-06(07)», определялся с помощью оптико-эмиссионного спектрометра «GNR SCP (GNR Solaris CCD)».

Для проведения испытаний на твердость по методу Роквелла использовали прибор «ТК-14-250». Твердость детали измеряли на рабочей поверхности.

Фазовый состав образцов исследован методом рентгеноструктурного анализа, который осуществляли в излучении на установке «ДРОН 3», оснащенной аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений. Контроль измерительной системы гониометра осуществлялся по стандартному эталону кристалла кварца.

Исследования образцов на износостойкость в лабораторных условиях проводились на специально разработанном стенде, конструкция которого обеспечивает проведение испытаний в условиях, максимально приближенных к реальному износу защитных деталей центробежного дробильно-размольного оборудования [1].

Полученные результаты. Химический состав образцов, вырезанных из деталей «Башмак ИМ4.04.003-06(07)», а также их твердость представлены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав и твердость образцов

№	Содержание элементов, %							HRC
	C	Cr	Ni	Mn	Si	V	Mo	
I	3,68	20	0,26	0,6	1,07	0,11	0,2	48,25
II	3,66	18,47	0,2	0,76	0,61	0,1	0,18	58

Как видно из результатов химического анализа, в первом образце с низкой твердостью большое количество кремния, который, как известно, является нежелательным элементом в хромистых чугунах. Необходимо отметить, что твердость вырезанного из первой детали образца оказалась несколько выше, чем при первом измерении на опытно-производственном участке, но все равно ниже допустимого минимального предела. В остальном состав двух образцов приблизительно совпадает, за исключением хрома, который не мог оказать столь отрицательного влияния на твердость детали.

Дальнейшим этапом исследования было определение фазового состава с помощью рентгеноструктурного анализа. После чего для определения стойкости деталей в лабораторных условиях были проведены сравнительные испытания образцов на удельный часовой износ (таблица 2).

Таблица 2. Фазовый состав и уд. часовой износ образцов

№	Фазовый состав				Удельн. часовой износ, г/см ² *ч
	Феррит	Аустенит	Цементит	Карбид (Cr, Fe) ₇ C ₃	
I	да	нет	нет	да	0,253
II	да	да	да	да	0,162

Как видно из таблицы, металлическая основа первого образца состоит исключительно из мягкого феррита, в отличие от феррито-аустенитной основы у второго. Это закономерно предопределило меньшую твердость и больший износ образца с повышенным содержанием кремния.

Закключение. Таким образом, высокое содержание кремния оказывает отрицательное влияние на твердость и износостойкость деталей ДРО.

1. Марукович Е. И., Ильюшенко В. М., Дувалов П. Ю., Калентионок А. И., Барановский К. Э. Изучение износостойкости деталей из хромистых чугунов, полученных литьем в кокиль // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: X Междунар. науч.-техн. конф.: сборник материалов. В 3 кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением, 16-18 сент. 2015 – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 52-57.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕЗАЩИЩЕННЫХ ПОЛИАМИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. Криваль, О.В. Рева

ГУО УГЗ МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь; volha107@rambler.ru

Введение. Полиамид-6 является востребованным конструкционным материалом с высокими прочностными характеристиками. Его недостатком является только высокая горючесть с выделением горящих капель и значительного количества токсичных продуктов термодеструкции. Для ингибирования процессов горения полиамида разработано достаточно много антипиренов различной природы: во многих литературных источниках упоминаются меламин и его производные, красный фосфор и полифосфат аммония, синергические системы на основе оксида сурьмы и галогенсодержащих органических соединений, неорганические синтетические фосфаты двух- и трёхвалентных металлов-аммония, полифосфаты и фосфинаты органической природы [1—3]. Набор требований к замедлителям горения достаточно большой: помимо совместимости с расплавом полиамидов и высокой огнезащитной эффективности они должны быть нетоксичными, экономичными и незначительно снижающими прочностные характеристики полиамида, поскольку одной из важнейших проблем введения замедлителей горения в полиамидную матрицу является ухудшение физико-механических свойств конечного композита, что недопустимо для конструкционного материала.

Результаты и обсуждение. Нами разработана новая комплексная огнезащитная композиция, включающая как органические полифосфинаты и аммонийные агенты, выделяющие негорючие газы, так и минеральные компоненты, отвечающие за процессы структуризации твердой фазы. При введении этой композиции в расплав полиамида-6 методом экструдирования данная композиция не подвергается подплавлению и частичному разложению, что очень важно при многократной промышленной переработке модифицированного материала в пластичном состоянии, процессах формовки изделий и вытягивания нитей.

По результатам огневых испытаний новая синергическая композиция обеспечивает требуемую по ГОСТ категорию стойкости к горению ПВ-0 при довольно низком содержании в матрице — 10—12 мас.%, в отличие от большинства описанных в литературе замедлителей горения, содержание которых в полиамиде может достигать до 30 мас.%. При проведении огневых испытаний модифицированных новой композицией полиамидных образцов наблюдается не только отсутствие растекания материала и

падения горящих капель, но и формирование после быстрого затухания несколько вспененного коксового слоя, препятствующего последующему возгоранию.

Для определения физико-механических свойств полученных литых образцов полиамида-6, модифицированных новой огнезащитной композицией, было проведено экспериментальное исследование зависимости ряда характеристик композитного материала от содержания в нем замедлителя горения — прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве, ударная вязкость, изгибающее напряжение при статическом изгибе, модуль упругости, Табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость свойств полиамидного материала от содержания комплексного замедлителя горения

Содержание ЗГ в ПА, мас.%	0	6	8	10
Прочность при разрыве, МПа	72	69	68	66
Относительное удлинение при разрыве, %	15	5,72	5,84	5,84
Модуль Юнга, МПа	2600	2440,3	2363,8	2516,1
Максимальное напряжение при изгибе, МПа	85	99,20	88,30	95,43
Удлинение при изгибе, мм	12	10,43	9,61	9,96
Ударная вязкость по Шарпи (ISC 180)	80	63,87	67,57	56,06

Результаты испытаний показали, что огнезащитный материал становится несколько более хрупким и менее пластичным, но снижение большинства прочностных характеристик не превышает 9—11 % при максимальном содержании антипирена. Для значительного количества изделий из литьевого ПА-6 эти показатели допустимы.

1. Костюченко М.А., Ревако М.М. Влияние триазинового и неорганического фосфорного ингибиторов горения на эксплуатационные свойства и стойкость к горению стеклонаполненного полиамида-6 // Весці НАН Беларусі, № 2, 2013. – стр. 21–24
2. Богданова В.В. Огнегасящий эффект замедлителей горения в синтетических полимерах и природных горючих материалах // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. ст. / Под ред. О.А. Ивашкевича. – Минск: БГУ, 2003. – Вып. 2. – С. 344–375.
3. T Richard Hull, Baljinder K Kandola Fire Retardancy of Polymers. New Strategies and Mechanisms. - The Royal Society of Chemistry – 2009. – 433 p.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕТООТРАЖАЮЩИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ

Д.В. Криваль, О.В. Рева, В.В. Коваль

ГУО УГЗ МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь; volha107@rambler.ru

Введение. Создание светоотражающих металлических или металлосодержащих слоев на текстильной основе продолжает оставаться очень актуальным для совершенствования защитной одежды для пожарных, рабочих горячих цехов, электросварщиков. Существует множество способов получения таких слоев [1, 2]: методами вакуумного напыления и горячего прессования, ракового формования слоев из вязкого раствора металлопорошков на основе полимерного связующего, электрохимического и химического осаждения металлов; но часто каждый из них в отдельности не может обеспечить всех необходимых физико-механических и огнезащитных свойств изделия. Например, механическое нанесение даже на трудногорючие ткани вязких металлосодержащих полимерных паст может привести к резкому падению суммарной огнестойкости системы.

Результаты и обсуждение. Для решения данной проблемы нами были сформированы композитные многослойные изделия: на арселеновые ткани, пропитанные аммонийно-металлофосфатными замедлителями горения на основе связей соединений Mg и Ca, после термофиксации механически наносили слой металлосодержащей силиконовой смолы с толщиной ~8—9 мкм, допированной полифосфинатным антипиреном в количестве 5 мас. % (1). На этот слой, обладающий металлическим блеском, но не токопроводящий магнетронным напылением наносили блестящий электропроводный слой Al толщиной ~2 мкм (2). Другая группа композитных изделий была изготовлена на основе негорючей силикатной ткани: стеклоткань с магнетронным напылением Al ~2 мкм (3); и стеклоткань, на поверхность которой механически нанесен слой металлосодержащей силиконовой смолы, допированной полифосфинатным антипиреном с последующим магнетронным напылением Al (4).

Все изученные композитные системы по огневым испытаниям соответствовали категории стойкости к горению «трудногорючий» по требованиям СТБ 1972-2009 для защитной одежды. Однако не менее важными характеристиками композитных изделий на текстильной основе является способность к отражению ИК излучения и устойчивость к тепловому потоку; а также механическая прочность на разрыв.

В результате испытаний композитных материалов как верха защитной одежды по устойчивости к воздействию теплового потока и отражению ИК-излучения согласно СТБ 1972-2009, таблица, было установлено, что стеклоткань с магнетронным напылением алюминия (образец № 3) без дополни-

тельных подслоев не отвечает предъявляемым требованиям ГОСТ, очевидно ввиду наличия значительного количества пор. Ткани, на поверхности которых имеются грунтовочные слои металлосодержащих смол отвечают требованиям СТБ1972-2009 (коэффициент отражения ИК не ниже 70 %), причем наилучшими свойствами характеризуется образец (4) — стеклоткань со слоем огнезащитной силиконовой смолы и поверхностным магнетронным напылением алюминия.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов композитных изделий на отражение ИК-излучения

Композитное изделие, №	Коэффициент отражения ИК излучения				Усредненное значение $T_{отр}$, %
1	70,7	70,1	71,3	73,4	71,4
2	71,2	71,8	68,9	75,3	71,8
3	63	64,2	63,7	64,9	63,9
4	77,5	80,7	80,4	78,5	79,3

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 характеристиками (№ 2 и 4) на разрыв было установлено, что их прочность существенно выше регламентированной: так, для системы (2) разрывная нагрузка составляет 1500—1200 Н; для системы (4) — 1500—1700 Н при 800 Н нормативной. Сопротивление раздиранию: 58—63 Н и 92—96 Н соответственно при 32 Н нормативных.

Выводы. Таким образом, найдено, что свето-теплоотражающие металлосодержащие слои на текстильных подложках обладают наиболее высокими эксплуатационными характеристиками по комплексу требований ГОСТ в случае комбинирования нескольких типов обработки с обязательной грунтовкой материала огнезащитными полимерными связующими и финишным высокоэнергетическим напылением металла.

1. Артемов А.П. Металлизация текстильных изделий // В мире оборудования.— 2002 (10), — 27-30.
2. Дмитрикович, Н.М., Ю.Г. Русецкий, В.В. Гнутенко и др. Сравнительный анализ технологических процессов получения огнестойких тканей с металлизированным покрытием // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация.— 2004 № 6 (16), — 27-35.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.И. Куксенова, Д.А. Козлов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; koslov74@mail.ru

Введение. Практика эксплуатации машин и механизмов свидетельствует, что применяемые конструкционные материалы обладают требуемыми механическими свойствами, однако их сопротивляемость износу не всегда является достаточной. Как известно, износостойкость определяется свойствами поверхностных слоев, поэтому для её повышения многие современные технологии направлены на обработку поверхностей. При этом для высоконагруженных трибосопрежений в большинстве случаев при модифицировании поверхностей приходится сталкиваться с многочисленными ограничениями, которые связаны с сохранением уже существующих механических свойств обрабатываемых деталей. Зачастую это выражается в недопустимости значительного нагрева деталей. Данным требованиям отвечают ряд высокоэнергетических методов поверхностной обработки, к которым относят электроискровое легирование (ЭИЛ) и ионное легирование ускоренными пучками заряженных частиц (ИЛ). Эти методы хорошо себя зарекомендовали в производственной практике, а также в научных целях, прежде всего в трибологических исследованиях [1, 2].

Цель исследований. В данной работе исследованы результаты триботехнических испытаний тяжелонагруженных пар трения из стали 30ХГСН2А с нанесенными покрытиями из БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФЗ-6 методом ЭИЛ, а также пар трения, модифицированных методом ИЛ.

Методы исследования. Образцы перед нанесением покрытия и ионным легированием подвергали предварительной термической обработке, позволяющей повысить твердость до 42—45 HRC. ЭИЛ бронзовых покрытий осуществлялось на установке ЕЛФА-512М. Величина силы тока варьировалась 0,7—1,3 А, величина продольной подачи изменялась в пределах 0,5—1,8 мм/об. Число импульсов составляли 530 имп/мин. ИЛ осуществлялось на экспериментальной установке. Режимы ИЛ: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка ионов 0,1 А. Доза облучения изменялась от 10^{17} ион/см² до $5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Температура образцов при обработке была не более 100 °С. Оценочные триботехнические испытания проводились в лабораторных условиях на машине трения КЕ-4, а также на специально разработанном стенде, имитирующем работу шарнирно-болтового соединения [3]. Испытания проводились в условиях сухого трения. Пара трения прирабатывалась путем ступенчато повышаемой нагрузки до максимального давления 250 МПа.

Результаты и выводы. На рис. 1 представлена интенсивность изнашивания образцов после ИЛ.

Наименьшую интенсивность изнашивания проявляют образцы, легированные ионами меди с дозой 10^{17} ион/см². По результатам лабораторных испытаний данный режим был принят для обработки образцов с их последующими испытаниями на специальном стенде.

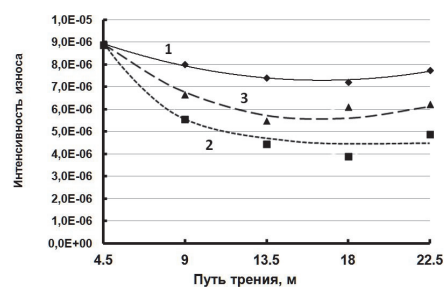


Рис. 1. Интенсивность изнашивания стали 30ХГСН2А при различных дозах ИЛ: 1-исх. образец; 2-имплантация с дозой 10^{17} см²; 3-имплантация с дозой 5×10^{17} см²

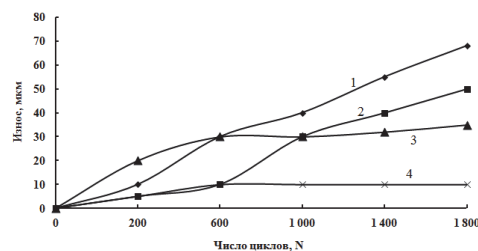


Рис. 2. Износ образцов, испытанных на стенде в производственных условиях: 1 — исходный образец; 2 — ЭИЛ (БрАЖМЦ10-3-1,5); 3 — ЭИЛ (БрМцФЗ-6); 4 — ИЛ ионами меди

На рис. 2 представлен износ образцов с нанесенным покрытием из бронз и образцов, обработанных методом ИЛ. Видно, что наилучшие результаты показывают образцы, подвергнутые ИЛ медью (кривая 4). Повышение износостойкости возрастает в 1,5, 1,7 и 5,7 раз. Приведенные данные показывают, что обработка поверхности стали 30ХГСН2А методами ЭИЛ и ИЛ дает высокий триботехнический эффект для одноименных тяжелонагруженных пар сухого трения.

1. Плодояло Р.Л., Шмидберская А.А., Штоколов С.С., Сызранцев В.Н., Ткаченко К.И. Сравнительный анализ технологий модификации поверхности деталей нефтегазового оборудования // Сварка и диагностика. – 2018, №2, 33–40.
2. Иванов В.И., Денисов В.А., Игнатьев Д.А. Использование современных ресурсосберегающих методов при изготовлении и ремонте деталей на примере электроискрового легирования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. № 23(6). С. 8–20.
3. Козлов Д.А., Овчинников В.В. Влияние марки бронзы на свойства стали 30ХГСН2А при электроискровом легировании. Машиностроение и инженерное образование, 2008, №1, с. 33–40.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЛИГНИНА И КВЕРЦЕТИНА, СТРУКТУРА И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Лю Имин¹, А.А. Рогачев², А.В. Рогачев¹, И.И. Концевая¹, С.А. Фролов¹, М.А. Ярмоленко¹

¹УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», Гомель, Беларусь

²Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

Лигнин — сложный природный полимер. Производные лигнина обладают низкой токсичностью, противовирусными и антиоксидантными свойствами, оказывают противовоспалительное, антидиабетическое и противоопухолевое действие, используются в качестве энтеросорбента [1]. Для лигнина характерна антибактериальная активность [2]. Повысить антимикробные свойства материала возможно при уменьшении размера частиц лигнина [3]. Кверцетин, как и лигнин, является природным антиоксидантом. Помимо высоких антиоксидантных свойств кверцетин обладает антибактериальными свойствами широкого спектра действия (*P. aeruginosa*, *E. coli*, *S. aureus* и др.) и ингибирующей активностью в отношении грибов, в частности *C. albicans*. Кверцетин способен оказывать противоопухолевое действие: предотвращать клеточный цикл, способствовать апоптозу клеток и ингибировать образование кровеносных сосудов в новообразованиях. Недостатком при использовании кверцетина является низкая и непостоянная скорость растворения в водных средах [4]. Наиболее простым способом повышения скорости растворения кверцетина в водных средах является уменьшение размера частиц до субмикронного. Количество технологических способов нанесения покрытий на основе кверцетина крайне мало и в подавляющем большинстве случаев осуществляется с использованием жидких сред. Таким образом, применение композиционных покрытий на основе лигнина и кверцетина может повысить и стабилизировать скорость растворения компонентов покрытия в водных средах. Это скажется на повышении биологической активности компонентов покрытия.

Основной целью представленной работы являлось исследование особенностей электронно-лучевого формирования, молекулярной структуры и антибактериальных свойств покрытий на основе лигнина и кверцетина.

В работе было показано, что воздействие потока электронов на лигнин сопровождается частичным разрушением молекулярной структуры исходного соединения. Это сказывается на структуре осажденного покрытия. В молекулярной структуре покрытия снижено содержание sp²-гибридизированных атомов углерода (более чем в 2 раза) и содержание эфирных связей. При этом покрытие характеризуется более высоким содержанием углеводородных фрагментов. Термообработка покрытия (200 °C) приводит к раз-

рушению эфирных межмолекулярных связей и отщеплению углеводородных заместителей от бензольных колец. Отжиг при более низких температурах нагрева не сопровождается заметной деструкцией молекулярной структуры тонкого слоя. Воздействие потока электронов на порошок кверцетина сопровождается частичным отщеплением гидроксильных групп, без разрушения бензольных колец. Нагрев покрытия до 200 °C инициирует разрушение —O— связей.

Рассмотрены особенности высвобождения кверцетина в водную среду из однокомпонентного и композиционного покрытий. Нанесение композиционного покрытия лигнин + кверцетин позволяет заметно (> 4 раза) снизить скорость высвобождения кверцетина в водную среду. Высвобождение кверцетина из композиционного слоя является равномерным.

Установлено, что покрытие на основе лигнина не обладает антибактериальной активностью в отношении штамма *E. coli* ATCC 25922. Отмечено статистически значимое снижение показателя КОЕ/мл для тонкого слоя на основе кверцетина (более чем в 13 раз), для композиционного покрытия лигнин + кверцетин — в 2 раза.

Благодарности. Исследование было поддержано в рамках комплексного задания 2.4.2 «Создание и использование новых композиционных лесохимических продуктов и биodeградируемых полимерных материалов»: НИР 1 «Разработка научных основ технологии формирования методом диспергирования наноконпозиционных полимерных покрытий, содержащих растительные полифенолы, изучение их структуры и биохимических свойств» (ИХНМ НАН Беларуси, ГГУ).

1. Fedoros, E.I. Exploring bioactivity potential of polyphenolic water-soluble lignin derivative / E. I. Fedoros [et al.] // Environmental Research. – 2020 (191), P. 110049.
2. Spiridon, I. Extraction of lignin and therapeutic applications of lignin-derived compounds. A review. / I. Spiridon // Environmental Chemistry Letters. – 2020 (18), 771 – 785.
3. Cavallo, E. UV Protective, Antioxidant, Antibacterial and Compostable Polylactic Acid Composites Containing Pristine and Chemically Modified Lignin Nanoparticles / E. Cavallo [et al.] // Molecules. – 2021 (26), 126.
4. Sheng, F. Preparation of quercetin nanorod/microcrystalline cellulose formulation via fluid bed coating crystallization for dissolution enhancement / F. Sheng [et al.] // International Journal of Pharmaceutics. – 2020 (576), 118983.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НИКОТРИРОВАНИЯ СТАЛИ 25Х3М3НБЦА

П.И. Маленко, А.Ю. Леонов, К.Д. Релмасаира

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Россия; malenko@tsu.tula.ru

При формировании защитных покрытий на сталях используется процесс низкотемпературного карбонитрирования, при котором химико-термическое насыщение их поверхности проводится одновременно азотом и углеродом, в частности, в смеси аммиака и эндогаза, получаемой при сгорании природного газа с недостатком воздуха (примерный состав 20% CO, 40% H₂, 40% N₂). Данную методику также называют никотрированием [1].

В процессе карбонитрирования образцов стали 25Х3М3НБЦА на поверхности формируется тонкий светлый («белый») слой карбонитридов, состоящий из γ' или $(\gamma'+\epsilon)$ -фаз, и нижележащий диффузионный подслоя, состоящий из твердого раствора азота и углерода в железе, нитридов и карбонитридов железа, а также из соединений легирующих элементов и примесей [2].

Моделирование термодинамических процессов карбонитрирования стали 25Х3М3НБЦА проводилось для условий, при которых получается максимальная толщина слоя $h_{\text{сл}}$ и глубина диффузионной зоны $h_{\text{дз}}$.

Для термодинамической системы «Сталь 25Х3М3НБЦА–газ» задавались следующие параметры: атмосферное давление $P = 1000$ Па, температура системы $T = 853$ К. Учитывалось наличие небольшой примеси серы и двух твердых растворов.

В расчётах задавалась «эффективный» состав, определяемый соотношением C/N для элементов, находящихся в активном состоянии в приповерхностных слоях газовой фазы и сплава. Расчёты проводились при соотношениях C/N=1/1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/8.

Результаты термодинамической оценки процесса карбонитрирования стали при $T = 853$ К и C/N=1/1, C/N=1/2 и C/N=1/3 представлены на рис. 1 в виде зависимости содержания компонентов в конденсированной фазе — x_i (или $\log x_i$) от доли компонентов газовой фазы в слое — g_i .

При соотношении C/N=1/1 расчёты показали (рис. 1, а), что на самой поверхности образца будет формироваться плёнка углерода, под которой на границе с металлом формируется слой карбида железа с примесью карбидов хрома, ниобия и марганца. Одновременно с карбидами, в том же слое наблюдаются и нитридные выделения на основе CrN с нитридами кремния, ниобия, цинка и железа, а также некоторое количество FeSi и MnS.

Двукратное увеличение относительного содержания активного азота на поверхности и в приповерхностных слоях приводит к уменьшению толщи-

ны слоя углерода на поверхности и более широкой области карбида железа с примесью карбидов хрома, ниобия и марганца (рис. 1, б).

Уменьшение доли углерода и увеличение доли азота до C/N=1/3 (рис. 1, в) будет приводить к тому, что основной фазой в поверхностных слоях будет железо. Формирующиеся соединения будут равномерно распределяться по глубине. В основном это твердые растворы нитридов хрома, железа, кремния, ниобия и цинка. Несколько меньше доля карбидных фаз: карбидов железа, хрома, ниобия и марганца.

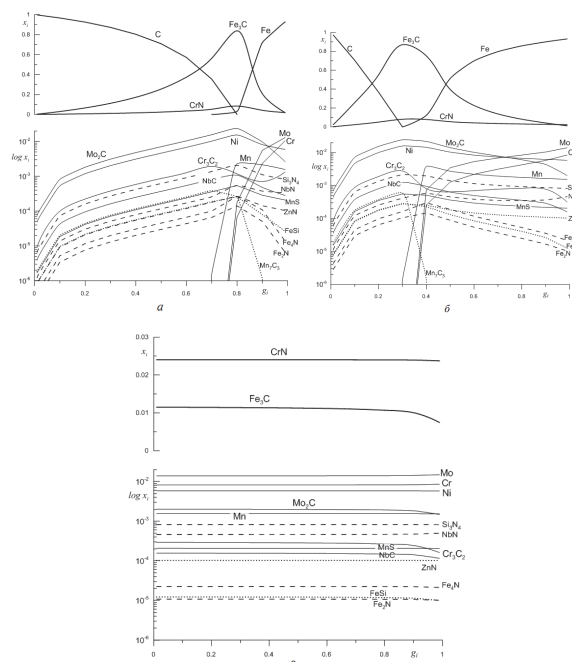


Рис. 1. Зависимость x_i (мольная доля) – содержания компонентов в поверхностных слоях стали от g_i – массовой доли компонентов газовой фазы при $T=853$ К и соотношении C/N: а – 1/1; б – 1/2; в – 1/3 (не показано содержание Fe ~ 0,93 мол. доли)

Из термодинамического анализа следует, что в стали 25Х3М3НБЦА при карбонитрировании состав образующихся покрытий в зависимости от соотношения C/N в газовой фазе может формироваться на основе карбидных или нитридных твёрдых растворов.

1. Чаттерджи-Фишер Р., Эйзелл В., Хоффманн Р. Азотирование и карбонитрирование / Под ред. А. В. Супова. — М.: Металлургия. — 1990
2. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Структура и прочность азотированных сплавов — М.: Металлургия. — 1982

СТАБИЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ КАТИОНИТОВ ФИБАН

Г.В. Медяк, А.А. Шункевич, А.А. Поликарпов, В.Ж. Ворса

Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, medyakg@ifoch.bas-net.by

Волокнистые иониты ФИБАН X-1 [1], содержащие иминодиацетатные группы, используются в виде пряжи в бытовых фильтрах очистки питьевой и технической воды от ионов тяжелых металлов и двухвалентного железа (ООО «Маджерик Текнолоджис», г. Москва; ООО «Технофильтр», г. Владимир). Разработаны более дешевые и получаемые из доступных и безопасных реагентов аминокарбоксильные волокна ФИБАН К-6 [2], перспективные для доочистки воды от катионов меди, свинца и кадмия в присутствии других ионов тяжелых металлов на фоне в 100 раз более высокой концентрации ионов кальция.

Цель работы — исследовать стабильность свойств катионитов ФИБАН от времени хранения и способа обработки перед использованием.

Материалы и методы. Объектами исследования служили образцы нетканого материала ФИБАН X-1, синтезированного в 1999 г., и штапеля из опытной партии ФИБАН К-6, полученной в 2018 г. Образцы, находящиеся в воздушно-сухом состоянии, в солевой, преимущественно кальций-магниевой форме, хранили в закрытых полиэтиленовых пакетах. Стабильность свойств волокнистых катионитов ФИБАН оценивали по изменениям их обменной емкости по карбоксильным и аминокетам, по изменениям их набухания в воде и в ИК-спектрах. Обменную емкость определяли титриметрически по методике, разработанной для полиамфолитов [3]. Набухание волокон определяли по разности масс сухого и набухшего образца после центрифугирования в течение 15 минут на центрифуге ОПН-8 при 4000 об/мин и ускорении $G = 900$ g. ИК-спектроскопические исследования проводили с использованием ИК Фурье спектрометра Protégé 460 фирмы Nicolet.

Результаты и их обсуждение. Физико-химические свойства ионитов определяли после перевода карбоксильных групп из солевой формы в водородную путем обработки волокон 0,5 н HCl и отмывки от избытка кислоты дистиллированной водой. Волокнистый катионит ФИБАН X-1 после хранения в течение 22 лет практически не изменил своих физико-химических характеристик (табл.). Такой вывод может быть сделан, поскольку погрешности в определении величин обменной емкости и набухания составляют примерно 10% от определяемой величины и связаны с неоднородностью полимерного материала. При хранении в течение 3,5 лет в солевой форме волокнистый катионит ФИБАН

К-6 также стабилен и сохраняет емкость по карбоксильным группам и величине набухания в воде (табл.). ФИБАН К-6 остается стабильным после трехкратной одночасовой обработки 0,5 н растворами кислот и щелочей, о чем свидетельствуют данные таблицы и результаты спектроскопического исследования образцов. В спектрах присутствуют характеристические полосы карбоксильных и аминокетам (1745 см⁻¹ и 1650 см⁻¹) одинаковой интенсивности. Небольшое уменьшение содержания аминокетам с одновременным увеличением набухания в воде для кондиционированного образца может быть связано с разрушением внутренней соли, образованной карбоксильной и аминокетамной группой, и последующим гидролизом.

Таблица – Физико-химические характеристики волокнистых катионитов ФИБАН

Марка	Время хранения	Способ обработки	ОЕ, мг-экв/г		W, г H ₂ O/г ионита
			по аминокетам	по COOH	
X-1	—	0,5н HCl	0,6	3,6	0,60
	22 года		0,6	3,2	0,63
К-6	—	0,5н HCl	1,5	4,8	0,42
	3,5 года		1,3	4,7	0,42
	3,5 года	K	1,2	4,8	0,45

ОЕ — обменная емкость, W — набухание в H-форме, K — кондиционирование трехкратной обработкой 0,5 н NaOH и HCl.

Таким образом, хранение волокнистых катионитов ФИБАН в солевой форме в воздушно-сухом состоянии не приводит к изменению их основных физико-химических характеристик и позволяет использовать их по назначению в течение длительного времени после получения.

1. Шункевич, А.А. Новые иминодиацетатные хелатные сорбенты ФИБАН для очистки воды / А.А. Шункевич, В.И. Грачек, А.П. Поликарпов, Г.В. Медяк, В. В. Пансевич, // Водные ресурсы и климат: материалы V Международного Водного Форума, 5-6 октября 2017 г., г. Минск : в 2 ч. / Белорусский государственный технологический университет ; [редкол. проф. д-р техн. наук. О. Б. Дормешкин и др.]. — Минск: БГТУ, 2017. — Ч. 2. — С. 115-119
2. Медяк, Г.В. Волокнистый сорбент ФИБАН К-6 и перспективы его использования для очистки воды / Г.В. Медяк, А.П. Поликарпов, А.А. Шункевич, В.И. Грачек, Р.В. Марцынкевич, З.И. Акулич, О.И. Исакович, С.Е. Радкевич // материалы XI Международного водно-химического форума г., Минск, 22 – 25 мая 2018 г.: ЭД – С. 106-112
3. Медяк, Г.В. Оценка факторов, влияющих на сорбцию диоксида серы волокнистыми анионитами ФИБАН / Г.В. Медяк, А.А. Шункевич, А.П. Поликарпов, В.В. Пансевич, З.И. Акулич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. — 2021. — Т. 57, № 2. — С. 101-108

ВЛИЯНИЕ ФАЯЛИТА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННЫХ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Г. Меликсетян, Г.О. Асчян

Национальный политехнический университет Армении, Ереван n_meliksetyan@mail.ru

В тормозных устройствах транспортных средств в Армении, из-за отсутствия собственного производства фрикционных материалов, в основном, используются тормозные колодки производства РФ и Украины. Широкое распространение получили изделия из ретинотехнических заводов ОАО «АТИ», ОАО «Фритекс», ОАО «ТИИР» ООО «Барнаульский завод автоформованных термостойких изделий» и ОАО «ТРИБО». Исходя из вопросов развития и обеспечения безопасности экономики РА, организация производств фрикционных материалов с использованием местного сырья стала насущной потребностью.

Цель. Исследование трибологических свойств различных тормозных фрикционных материалов вагонов метрополитена в направлении разработки новых материалов с применением местного сырья.

Постановка задачи. В тормоза легковых автомобилей внедрены новые безасбестовые тормозные фрикционные материалы на основе местного сырья под общим названием «Бастенит», разработанные в базовой научно-исследовательской лаборатории «Трибология» Национального политехнического университета Армении. Получены положительные результаты лабораторных испытаний тормозных колодок грузовых вагонов железнодорожного подвижного состава [1].

Перспективным является разработка новых типов фрикционных материалов «Бастенит» предназначенных для тормозов вагонов подвижного состава метрополитена путем научно обоснованного подбора новых наполнителей и изменения технологических режимов изготовления.

Материалы и методы. Исследованию подверглись образцы из фрикционных материалов типа Бастенит и композиционных тормозных колодок, изготовленные по ТУ 2571-049-13173305-98 в предприятиях ОАО «АТИ» и ООО «Барнаульский завод автоформованных термостойких изделий». На основании анализа теоретико-экспериментальных данных в качестве наполнителя из местного сырья для материалов Бастенит был выбран фаялит (Fe_2SiO_4) из отходов Алавердийского медеплавильного производства РА. Сравнительные эксперименты проводились на инерционном стенде ТС-1 по требованиям НБ ЖТ ЦВ-ЦЛ 009-99.

Результаты и их обсуждение. Средний коэффициент трения материалов с повышением температуры первоначально увеличивается и имеет макси-

мальное значение при температурах 230—270 °С (5—7 торможение). Далее при увеличении поверхностной температуры коэффициент трения уменьшается до минимального значения при 300—360 °С (10—13 торможение). Во всех случаях зависимость коэффициента трения материалов от поверхностной температуры выражается кривой, имеющей зону снижения в интервале 220—360 °С с резким переходом от сравнительно высокого трения до уровня, практически соответствующего трению при смазке.

Эксперименты показывают, что образцы из материала Бастенит с фаялитом нагреваются более медленно и они в нагревном режиме трения по износостойкости превышают аналогам – линейный износ почти на 40 % меньше. Детальный осмотр поверхностей трения фрикционных образцов указывает на то, что трение материала Бастенит с фаялитом происходил в режиме структурной приспасабливаемости контактных поверхностей [2], а трение аналогов сопровождался интенсивным износом - на поверхности трения видны участки глубокого вырывания и отслаивания.

Вывод. По результатам исследований фрикционных материалов на инерционном стенде ТС-1 установлено, что композиционный материал «Бастенит» с содержанием фаялита обладает более высокими и стабильными свойствами и по трибологическим характеристикам удовлетворяет требованиям стандарта ГОСТ 33724.1–2016. Рекомендуется проводить дальнейшие дорожные эксплуатационные испытания и применять его для изготовления фрикционных накладок вагонов метрополитена.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта «Разработка технологии получения безасбестовых тормозных накладок для автомобилей специального назначения с использованием отходов горнодобывающей промышленности Республики Армения» в базовой проблемной лаборатории «Трибология» Национального Политехнического Университета Армении.

1. Н.Г. Меликсетян, С.Г. Агбалиян Трибологические исследования фрикционных тормозных материалов в Национальном Политехническом Университете Армении. Collection of scientific papers on materials XIV International Scientific Conf. "Scientific achievements of the third millennium" .-USA Los Angeles 2021 p 33-41 <https://elibrary.ru/item.asp?id=46300562>.
2. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М., Наука, 1981. -126 с.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ ПЛЕНОК ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА С НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯГ.Б. Мельникова¹, Т.Н. Толстая¹, Д.В. Сапсальёв², А.С. Петровская¹, С.А. Чижик¹¹Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; galachkax@gmail.com²Белорусский государственный педагогический университет имени М.Танка, Минск, Беларусь

Введение. Для получения функционального, готового для применения материала, содержащего нанослои, потенциально обладающие необходимыми свойствами, требуется подбор как состава, так и условий получения материала. Правильный выбор материала модификатора, а также состав композиционного раствора, условия и способ нанесения являются определяющими при разработке сенсорных элементов. Одним из перспективных способов формирования является метод Ленгмюра – Блоджетт [1]. Внесение в суспензию наночастиц повышает чувствительные, селективные и функциональные свойства материала. Изучение влияния температуры на локальные механические свойства композиционных пленок позволяет получить фундаментальную информацию о свойствах новых материалов и дать оценку возможности использования их в качестве селективных слоев термодатчиков [2].

Методы и материалы

Выделение пленок методом Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) проводили с использованием горизонтального типа выделения при сжатии монослоя, достигаемом одновременным движением двух барьеров на установке «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь) при поверхностном давлении $\pi = 25$ мН/м. Использовали раствор полиметилметакрилата (ПММА, Sigma-Aldrich, $M_r \sim 10\,000$) с концентрацией 1 мг/мл и суспензию наночастиц SiO_2 (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{--}20$ нм) в хлороформе. Композиционные пленки получали с содержанием наночастиц от 41,7 до 333 моль SiO_2 на 1 моль ПММА.

В качестве подложек использовали кремниевые пластины, предварительно гидрофилизированные в смеси растворов перекиси водорода и аммиака.

Определение модуля упругости (E) проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь). Использовали кремниевые кантилеверы NSC 11 A (Mikromasch, Эстония) с радиусом кривизны острия зонда $R = 10$ нм и константой жесткости консоли 3 Н/м по модели Джонсона-Кенделла-Робертса. Нагревание образцов тонких пленок до 140 °C проводили с использованием АСМ термоплатформы.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований пока-

зано, что увеличение концентрации наночастиц SiO_2 в композиционных пленках ПММА (толщина 7 нм) приводит к возрастанию локальных значений модуля упругости от 437,9 до 860,4 МПа (рис. 1).

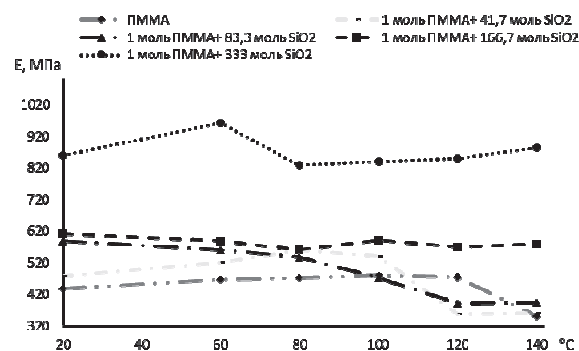


Рис. 1. Влияние температуры на модуль упругости ЛБ-пленок ПММА и с различным содержанием наночастиц SiO_2

Нагревание пленок до 100 °C не приводит к изменению значений модуля упругости в пределах экспериментальной ошибки ($\pm 10\%$), дальнейшее увеличение температуры до 140 °C для пленок ПММА и с содержанием наночастиц 41,7 и 83,3 моль на 1 моль ПММА вызывает снижение E до 390 МПа. Для композиционных пленок с высокими содержанием наночастиц 167 и 333 моль на 1 моль ПММА нагревание не приводит к размягчению пленок, что свидетельствует о равномерном распределении наночастиц в полимерном слое и определяется свойствами наночастиц.

Заключение. Тонкие ЛБ-пленки ПММА с содержанием наночастиц 41,7 и 83,3 моль могут быть использованы в качестве селективных слоев термодатчиков.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ на 2021–2025 гг. "Энергетические и ядерные процессы и технологии", подпрограммы "Энергетические процессы и технологии" (задание 2.25).

- Wu Y. Langmuir-Blodgett assembly of carboxylic multiwalled carbonnanotubes-nafion for amperometric sensing of codeine / Y. Wu [et. al.] // J. Electrochemical Society. – 2019. – Vol. 166 (13). – P. 592-597.
- Жебентяев А.И., Дударева И.Н. Химические сенсоры: Сообщение 1. История развития и принципы работы химических сенсоров // Вестник фармации. – 2015. – Т. 70, №4. – С. 103-111.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; nil_pt@bntu.by

В настоящее время зарядочувствительные методы измерения практически не применяются для анализа процессов воздействия ультрафиолетового (УФ) излучения на защитные покрытия. Основные преимущества зарядочувствительного метода – высокая чувствительность к изменению зарядового состояния поверхности, вызванного механическими напряжениями, изменению химического состава, адсорбционными процессами и др. [1—3]. Кроме того, данные методы не разрушающие, то есть они не оказывают необратимого воздействия на исследуемую поверхность. При этом использование сканирующей модификации (приборы серии СКАН [4]) позволяет получить карту распределения потенциала (работы выхода электрона) поверхности с высоким разрешением.

В качестве материала подложки использована сталь марки 08ПС 40×40мм, толщиной 1 мм. Подложка обработана на шлифовальном станке, перед началом эксперимента поверхность обработана наждачной бумагой Р2000. Половина пластины (верхняя часть, рис. 1, а) покрыта лаком «PLASTIK 70». Покрытие наносилось в один слой путем распыления из аэрозольного баллончика. Время сушки составило 24 часа при комнатной температуре.

На рис. 1, б представлены результаты исследования влияния на образец УФ-излучения. Образец с покрытием был выдержан в течение 20 минут под УФ-излучением с длиной волны (365 ± 5) нм средней интенсивностью 150 Вт/м^2 . Во время экспозиции половина образца была закрыта сверху тонкой алюминиевой пластиной. Сканирование образца выполнялось после прекращения экспозиции. Из результатов исследования, на образце выделены 4 области распределения потенциала (рис. 1, б): А — область с покрытием, подверженная воздействию УФ; Б — область с покрытием, не подверженная воздействию УФ; В — область без покрытия, подверженная воздействию УФ; Г — область без покрытия, не подверженная воздействию УФ. Из результатов следует, что воздействие УФ-приводит к изменению состояния поверхности как в области с покрытием, так и без него. Последнее может характеризоваться наличием окисных слоев. Процессы, вызванные воздействием УФ, не прекращаются резко. Восстановление зарядового состояния образца к исходному наблюдается более чем через 20 часов после завершения экспозиции (рис. 1, в).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования в рамках гранта аспирантам (№ гос. рег. 20220571).

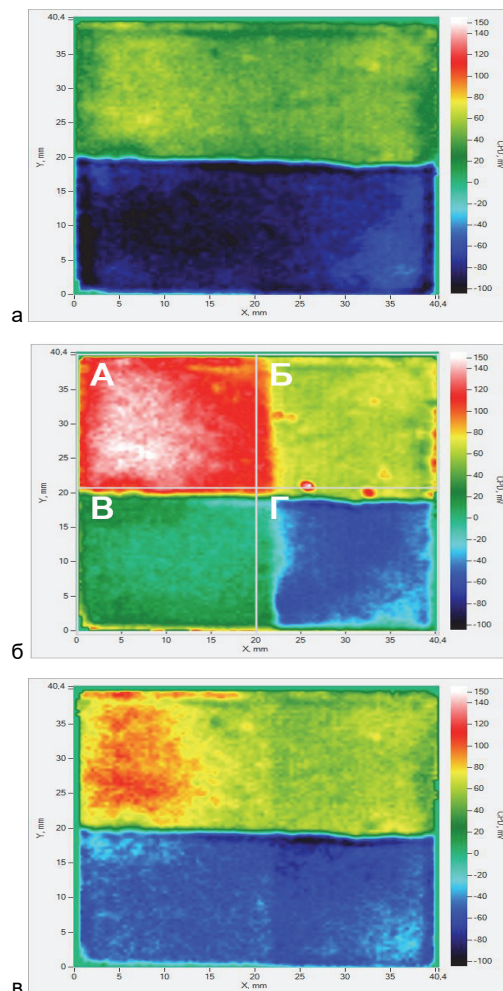


Рис. 1. Карты распределения работы выхода электрона поверхности образца стали 08ПС с покрытием «PLASTIK 70»: а — подложка, наполовину покрытая лаком (лак сверху); б — после экспозиции УФ-излучением в течение 20 минут (А — область с лаком, подверженная воздействию УФ; Б — область с лаком, закрытая от УФ; В — область без лака, подверженная УФ; Г — область без лака, закрытая от УФ); в — через 20 часов после экспозиции УФ-излучением

1. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В. А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017, Т. 8, № 4. – С. 344–356.
2. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials / Pantisaleyeu K. [et. al] // IAPGOS, 2020, № 10, vol. 4. P. 57–60.
3. Растровая сканирующая фотостимулированная электрометрия для контроля прецизионных поверхностей / Р.И. Воробей [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. – С. 66–73.
4. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface / Pantisaleyeu K. [et al.] // Eurasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2(5). – p. 11–15.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ИЗНОСА ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС
С УЧЕТОМ ИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, С.В. Киргинцева, М.В. Москалева

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; mozh@gsu.by

Введение. Применение в мировой практике высокоскоростного и надежного промышленного транспорта, а также усовершенствование новых способов передачи движений требует создания новых армирующих материалов и инженерных методик расчета. Например, при исследовании контактного взаимодействия упругих тел из композитов возникает необходимость создавать новые методики расчета прочности и износа зубьев.

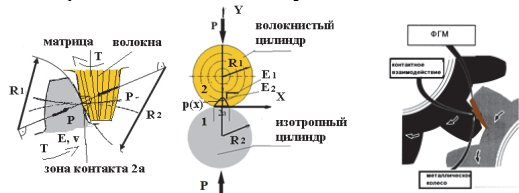


Рис. 1. Пример схемы контакта двух зубьев зубчатой передачи из изотропного и композиционного материалов и с покрытием, E_1, E_2 — модуль упругости волокнистого цилиндра

В связи с этим разрабатываются новые математические модели и компьютерные программы расчета напряжений при контакте индентора с упругим телом (или покрытием) из композита при различных физических параметрах взаимодействия.

Постановка задачи. На основе теоретических исследований [1, 2] предлагается применение математических моделей для расчета и описание влияния ориентации волокон в композите, а также других конструктивных параметров на параметры статического контакта зубьев зубчатых колес в передаче (Рис. 1). Решается ряд контактных задач о взаимодействии металлического цилиндра с цилиндром, обладающим ортотропией упругих свойств материала, функционально-градиентными и с упругим покрытием (как изотропным, так и анизотропным). В результате решения интегральных уравнений определялись размеры зоны контакта и контактное давление. Затем строится методика определения износа зубьев в зависимости от конструктивных параметров и создания математической модели на основе планирования эксперимента.

Методы исследования. Примем, что поведение цилиндрических тел в контакте описываются физическими уравнениями теории анизотропной упругости. Был разработан алгоритм, и создана программа, реализующая решение интегрального уравнения методом разложения по многочленам Чебышева. Используя известные методики расчета износа зубчатых колес из металла (например, методику Ю.Н. Дроздова), легко был построен расчет износа для зубчатого колеса из волокнистого композиционного материала.

Полученные результаты. Произведем расчет зубьев на износ на основе использования безразмер-

ной характеристики износа I_h . За одно зацепление величину проскальзывания (путь трения скольжения S) в пределах площадки касания зубьев можно выразить соотношением: $S = 2a\lambda$, где a — полуширина площадки контакта, определяемая с учетом рассматриваемой задачи о контакте [1]. После преобразований имеем формулу для расчета толщины изношенного слоя: $h_i = 2a\lambda n t z I_h$. Применялась также автоматизированная методика для обработки результатов в случае компьютерного условного эксперимента (см. Рис. 2).

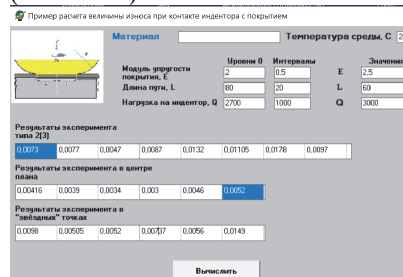


Рис. 2. Результаты расчетов для компьютерного эксперимента

Расчетный пример. Рассмотрим пример расчета износа зубьев колеса из волокнистого композита со следующими данными (расчет упругих постоянных производился по правилу смесей с учетом матрицы и волокна): $E_f = 210$ ГПа; $G_f = 83$ ГПа; $\nu_f = 0.27$; $E_m = 70$ ГПа; $G_m = 26$ ГПа; $\nu_m = 0.34$; $P = 1$ Н; $E = 210$ ГПа; $\nu = 0.27$; $K = 0.22$; $t = 2000$ час; $I_h = 4 \cdot 10^{-7}$; $n = 2$; $z = 2$ (число пар в зацеплении); $iN_1 = 2190$ об/мин; $iN_2 = 2190$ об/мин.

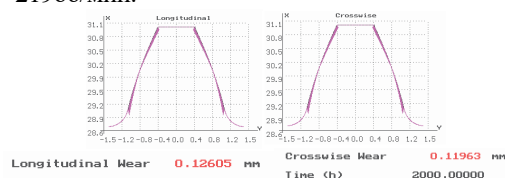


Рис. 3. Графическая интерпретация износа зуба для расчетного примера, полученная с помощью программы

На рис. 3 показан профиль зуба зубчатого колеса и величины износа (линейная) в зависимости от расположения волокон: продольного и поперечного.

- Можаровский, В.В. Прикладная механика слоистых тел из композитов / В.В. Можаровский, В.Е. Старжинский. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 290 с.
- Mozharovsky, V.V. Calculation of the contact interaction of gear teeth from composite materials / D.S. Kuzmenkov, S.V. Kirhinsava // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – February, 2022. – Vol. 9, Issue 2. – P. 3480-3488.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УНИПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ НА РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Р.И. Нестерчик, С.М. Завадский, Х.Т. Доан

Государственное учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь

Одним из наиболее перспективных методов формирования композитных плёнок является реактивное магнетронное распыление [1]. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения и химическую чистоту наносимых слоев, позволяет в широких пределах варьировать стехиометрический состав пленок за счет изменения парциального давления реактивного газа в камере и условий нанесения. Импульсное питание магнетрона позволяет обеспечить большую стабильность процесса нанесения. Однако процесс является недостаточно исследованным.

Основными параметрами импульсного униполярного питания магнетронных распылительных систем являются частота F и коэффициент заполнения D питающих импульсов. В зависимости от вариаций этих параметров следует ожидать изменения мгновенных значений тока разряда при неизменном его среднем значении. Была проведена серия экспериментов, в которой изменялись временные параметры импульсов при стабилизированном токе разряда (1,5 А). Были получены эпюры напряжения и тока для коэффициентов заполнения 80% (рис. 1), 50% (рис. 2) и 20% (рис. 3).

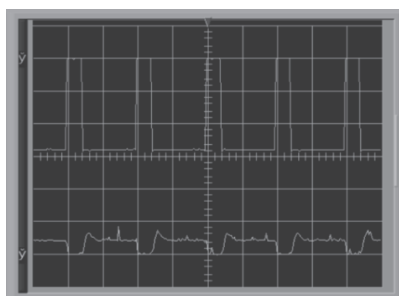


Рис. 1. Форма напряжения и тока разряда магнетрона при униполярном импульсном питании $F = 1$ кГц, коэффициент заполнения 80%

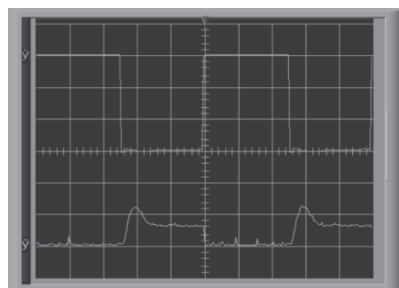


Рис. 2. Форма напряжения и тока разряда магнетрона при униполярном импульсном питании $F = 1$ кГц, коэффициент заполнения 50%

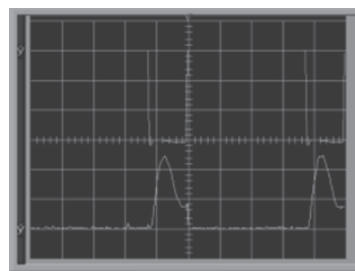


Рис. 3. Форма напряжения и тока разряда магнетрона при униполярном импульсном питании $F = 1$ кГц, коэффициент заполнения 20%

Установлено, что в зависимости от изменения скважности сильно изменяется амплитудное значение тока разряда. Так при изменении коэффициента заполнения D от 20 до 80% амплитудное значение тока разряда изменялось от 3 до 25 А. При этом на токовых эпюрах можно выделить два основных участка. Первый участок с нарастающим током соответствует начальной фазе разряда. После него следует участок с установившимся током, что соответствует стационарному режиму горения разряда. При этом длительность первого участка и наклон не постоянны, скорость изменения тока разряда на этом участке может сильно меняться как от скважности, так и от частоты (рис. 4).

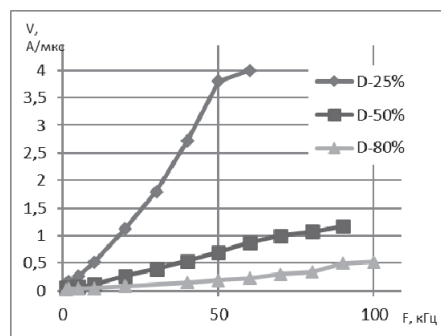


Рис. 4. Зависимость изменения скорости нарастания тока разряда от частоты для различного коэффициента заполнения

Данное поведение разрядных характеристик при импульсном режиме работы можно объяснить процессами перезарядки в зоне плазмообразования магнетронного разряда и увеличением передаваемой разряду мощности от блока питания при работе в режиме стабилизации тока.

1. Берлин, Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2014. – 256 с.

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ ПОЛИАНИЛИНА С О-АНИЗИДИНОМ И АНИЛИН-2-СУЛЬФОКИСЛОТОЙ, ДОПИРОВАННЫЕ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА НИКЕЛЯ

Х.А. Новик¹, Л.Н. Филиппович^{1,2,3}, Ж.В. Игнатович¹, С.Н. Шахаб^{1,2,3}, В.Е. Агабеков^{1,2}

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова», Минск, Беларусь

Введение. Композиты на основе полианилина (ПАНИ), допированные наночастицами металлов и их оксидов, благодаря высокой стабильности и электропроводности, низкой токсичности и себестоимости находят применение при создании сенсорных устройств нового поколения, полимерных тонкопленочных поляризаторов, накопителей энергии [1]. Цель работы – разработать эффективные методы синтеза композитов на основе сополимеров ПАНИ с о-анизидином и анилин-2-сульфокислотой с наночастицами NiO для последующего включения в поливинилспиртовую матрицу (ПВС) с целью создания гибких электропроводящих материалов.

Материалы и методы. 1. Получение сополимера полианилина и о-анизидина. 7 мл конц. соляной кислоты растворили в 100 мл воды, прибавили 1,83 мл о-анизидина и 2,72 г анилина гидрохлорида и перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре в течение 30 мин. Затем прибавили 4,12 г персульфата аммония и продолжили перемешивать в ледяной бане 5 ч. Осадок ПАНИ/о-анизидина отделяли центрифугированием, промывали дист. водой и 0,5 М водно-этанольным раствором HCl.

2. Сополимер полианилина и анилин-2-сульфокислоты получали аналогично 1, вместо о-анизидина использовали 2,00 г анилин-2-сульфокислоты, 1,55 г анилина гидрохлорида и 3,28 г персульфата аммония.

3. Получение композитов сополимер полианилина и о-анизидина/анилин-2-сульфокислоты – NiO проводили в две стадии. На первой стадии получали наночастицы NiO: к 40 мл 1 М раствора $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ в этаноле прибавили 10 мл 5 М раствора NaOH, перемешивали на магнитной мешалке в течение 2 ч при комнатной температуре. Светло-зеленый осадок гидроксида никеля отфильтровали и сушили 3 ч при 100–110 °С, затем прокаливали в муфельной печи при 450 °С 2 ч. На второй стадии получали композиты: 0,015 г NiO ресуспендировали в 100 мл 2,2 М раствора HCl, перемешивали на магнитной мешалке 1 ч и далее процесс проводили аналогично получению соответствующего сополимера по методикам 1 или 2.

Результаты и обсуждение. Композиты на основе сополимеров полианилина с анилин-2-сульфокислотой и о-анизидином, допированные наночастицами оксида никеля представляют собой сферические

агрегированные частицы со средним размером от 1,5 до 3,5 мкм (рис. 1). По данным УФ-спектроскопии (рис. 2, а) присутствует поглощение в области 300–380 нм, которое относится к электронным π, π^* -переходам фенильных колец, связанным с амино и имино-структурами ПАНИ и максимум поглощения в диапазоне 800–850 нм, характерным для электропроводящей эмералдиновой формы ПАНИ.

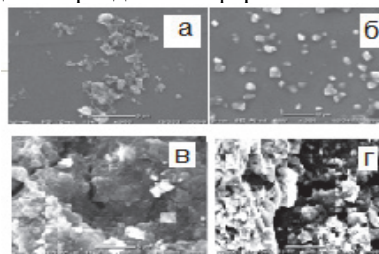


Рис. 1 СЭМ – изображения композитов (сополимеров) ПАНИ: с анилин-2-сульфокислотой (а), с о-анизидином (б), допированные NiO (0.75 мас.%, в и г).

В ИК спектрах (рис. 2, б) присутствуют основные полосы при 1580 и 1504 cm^{-1} , которые соответствуют колебаниям хиноидного и бензольного колец соответственно, при 1299 cm^{-1} колебаниям связи C–N, при 1240 cm^{-1} – C–N⁺.

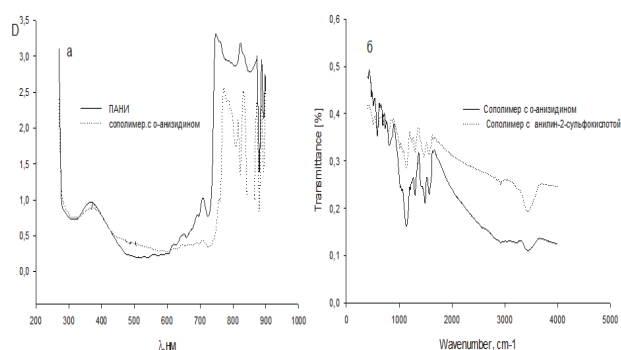


Рис. 2 УФ- (а) и ИК- (б) спектры композитов ПАНИ.

Таким образом, разработаны и оптимизированы методы синтеза сополимеров полианилина по реакции окислительной полимеризации с выходом 78–90%, получены допированные НЧ NiO композиты с электропроводностью (прессованная таблетка) от $1,46 \cdot 10^{-4}$ См/см до $5,16 \cdot 10^{-4}$ См/см.

1. Полианилин: синтез, свойства и применение / Ж.А. Боева, В.Г. Сергеев // ВМС. Серия С. – 2014, том 56, №1. – С. 153–164.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А.А. Охлопкова, Н.Н. Лазарева, Р.В. Борисова, Т.А. Охлопкова, П.Н. Тарасова

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

Цель работы

Создание износостойких полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ и СВМПЭ.

Материалы и методы. Полимерные матрицы: политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки ПН 90 (производитель – АО «ГалоПолимер», Россия) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки GUR 4022 (производитель — «Celanese», Германия). Наполнители: природные слоистые силикаты, углеродные (УВ) волокна, неорганические оксиды, нитриды, бориды с наномасштабными размерами.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) создавали по следующим технологиям: 1) использование ПАВ при механоактивации слоистого силиката перед смешением со СВМПЭ [1, 2]; 2) механоактивация слоистых силикатов в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2S» (производитель «Активатор», Россия) перед смешением с ПТФЭ [1, 3]; 3) комплексное наполнение ПТФЭ – углеродными волокнами и нанотрубками с слоистыми силикатами, слоистыми силикатами и шпинелью магния (ШМ) [4, 5]; 4) технология совмещения наноразмерных неорганических оксидов и СВМПЭ под воздействием ультразвуковых волн в среде этилового спирта с последующим горячим прессованием [6]; 5) технология бромирования СВМПЭ и создания композитов на их основе [7].

Проведены исследования деформационно-прочностных (ГОСТ 11262-80, ГОСТ 11262, ГОСТ 9550) на разрывной машине Shimadzu AGS-J (Япония), триботехнических характеристик по схеме трения «pin-on-disc» на трибометре UMT-3 CETR (США).

Структуру разработанных ПКМ исследовали с помощью ИК-спектроскопии, рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение. Использование технологии совместной механоактивации каолинита с ПАВ (цетилтриметиламмоний бромидом ЦТАБ) при создании композитов на основе СВМПЭ способствовало снижению скоростей линейного и массового изнашивания полимерных композитов в 2,5 и 5 раз, соответственно, снижению коэффициента трения и повышению сопротивления к абразивному износу по сравнению с аналогичным полимерным композитом без ЦТАБ [1, 2].

Установлена оптимальная продолжительность механоактивации слоистых силикатов, равная 2 мин, при соотношении мелющих тел 1:40. Исследование

триботехнических характеристик композитов на основе ПТФЭ показало, что износостойкость композитов, содержащих 7 мас.% бентонита увеличивается в 1040 раз при сохранении физико-механических свойств на уровне ненаполненного ПТФЭ [3].

Исследованы триботехнические свойства композитов с неорганических оксидов в количестве от 0,1—2 мас.% под действием УЗ колебаний. Зарегистрировано увеличение износостойкости в 7 раз в случае наполнения СВМПЭ наноразмерными частицами SiO₂ и ZrO₂ [6].

Исследование поверхностей трения полимерных композитов на основе ПТФЭ, содержащих слоистые силикаты в сочетании с наноразмерной шпинелью магния, показало формирование вторичной структуры из продуктов физико-химического взаимодействия компонентов композита в процессе изнашивания [5]. Методом СЭМ было показано, что поверхность композитов становится более сглаженной, ориентированной по направлению скольжения, что свидетельствует о структуре, наиболее адаптированной к условиям трения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ НИР № FSRG-2020-0017 по части создания нанокompозитов по технологии №№ 1, 2, 4, 5 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20056, <https://rscf.ru/project/22-13-20056/> по части создания нанокompозитов по технологии № 3.

1. Kirillina Iu. V. et al. Nanocomposites Based on Polytetrafluoroethylene and Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene: A Brief Review // Bulletin of Korean Chemical Society. — 2014 (35), №. 12, 3411—3420
2. Nikiforov L.A. et al. Surfactant Effects on Structure and Mechanical Properties of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene/Layered Silicate Composites // Molecules. — 2017, №. 22, 2149—2158.
3. Sleptsova, S.A. et al. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), №. 6, 469—475
4. Okhlopkova A.A. et al. Study of the Influence of Carbon Fiber and Bentonite on the Tribological Properties of PTFE // Journal of Friction and Wear. — 2020 (41), №. 6, 571—577
5. Тарасова П.Н. и др. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники // Авиационные материалы. — 2022 (66), №. 1, 51—64
6. Охлопкова Т.А. и др. Технология жидкофазного совмещения сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами неорганических соединений под действием ультразвуковых колебаний // Журнал прикладной химии. — 2016 (89), №. 9, 1179—1186
7. Borisova R.V. et al. Bromination of UHMWPE Surface as a Method of Changing Adhesion to Nanoparticles // Materials Today Communications. — 2018 (14), 65—71

КИНЕТИКА ПРОМОКАНИЯ ВОДОЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР

Д.К. Панкевич¹, В.Г. Кудрицкий²

¹Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет», Витебск, Республика Беларусь; dashapan@mail.ru

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь.

Исследование посвящено водозащитным композиционным материалам для одежды, содержащим в своей структуре текстильные слои, соединенные с полимерными мембранами различных структур.

Цель. Выявить характерные особенности процесса промокания при воздействии гидростатического давления на водозащитные композиционные материалы различных структур для определения области их применения.

Материалы и методы. Исследовали материалы для одежды, полученные методом ламинирования полиэфирной текстильной основы полимерной микропористой гидрофобной или гидрофильной мембраной (табл. 1).

Таблица 1. Объекты исследования

Номер образца	Толщина, мм			Поверхностная плотность, г/м ²
	общая	мембрана гидрофобная	мембрана гидрофильная	
1	0,34	—	0,12	156
2	0,13	—	0,05	180
3	0,19	—	0,07	110
4	0,25	0,10	—	133
5	0,25	0,10	—	128
6	0,18	0,05	—	160

Исследование структуры образцов проведено на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH («TESCAN», Чехия) в Белорусском республиканском центре зондовой микроскопии Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, РБ. Технические характеристики микроскопа: максимальное разрешение 3 нм, увеличение $\times 4$ –1000000, максимальный размер кадра 4096 $\times$ 4096 пикселей.

Кинетику промокания материалов исследовали с помощью портативного прибора, принцип действия которого описан в источнике [1]. В электрическую цепь прибора подключали параллельно источник тока с напряжением 10 В и цифровой мультиметр АРРА-207 с программным обеспечением, которое автоматически регистрирует силу тока каждые 0,5 секунды с точностью 0,004 мА. Это позволило проводить исследование методом электродинамической аналогии [2]. Образец материала подвергали действию гидростатического давления по следующей схеме: быстро повышали давление до 100 000 Па, если в течение одной минуты не регистрировали силу тока более 0,004 мА, то повышали давление на 20 000 Па. Дискретное повышение дав-

ления прекращали, когда наблюдали изменение силы тока свыше 0,004 мА, расценивая это как начало промокания образца. Регистрировали время наступления следующих стадий намокания материала:

1) начало насыщения материала влагой — соответствует возникновению в сети тока силой 0,1 мА.

2) полное насыщение материала влагой — соответствует возникновению в сети тока силой 0,15 мА.

3) начало сквозного промокания — соответствует возникновению в сети тока силой 0,2 мА.

4) сквозное промокание — соответствует возникновению в сети тока силой 0,25 мА.

Результаты и их обсуждение. При воздействии на материалы гидростатического давления фронт воды движется от лицевой стороны материала к изнаночной с некоторой скоростью. Материалы, содержащие гидрофильную мембрану, промокают быстрее и при меньшем давлении по сравнению с материалами, которые содержат мембрану из гидрофобного полимера. Они достигают первой стадии намокания примерно за 11 минут и затем довольно быстро промокают насквозь (табл. 2).

Материалы с гидрофобной мембраной в три раза дольше удерживают гидростатическое давление до начала насыщения материала влагой, поэтому их можно рекомендовать для изготовления водозащитной одежды высокого класса защиты.

Таблица 2. Результаты испытаний

Номер образца	Время до наступления стадии промокания, мин				Давление, Па
	1	2	3	4	
1	11,5	14	14,4	16,5	100 000
2	11	13,5	14	16,1	100 000
3	11	25	32,2	37,7	100 000
4	35	40	43,4	45,5	120 000
5	38,2	42,3	44	47,6	160 000
6	26,5	30,2	36	38,6	200 000

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования Республики Беларусь (шифр задания 8.4.2.1, № ГР 20211002).

1. Патент РБ № 12855 Республика Беларусь, МПК G01N3/20. Прибор для определения водозащитных свойств материалов методом гидростатического давления : № u 20210283; заявл. 15.10.2021; опубл. 30.04.2022, Бюл. №2.
2. Шайхлисламов К. М. Применение метода электродинамической аналогии в системе энергоэффективного управления эксплуатацией нефтяных месторождений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2017. Т. 17, № 4, 107–113.

МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

А.С. Парфенов¹, А.В. Волков¹, Е.В. Березина¹, В.А. Годлевский²

¹Ивановская государственная медицинская академия, Иваново, Россия; alsparf@gmail.com

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

Цель. Работа посвящена исследованию взаимодействия между наноразмерной присадкой и частицами абразива в смазочном материале. Предложена гипотеза способности абразивных частиц выступать в роли транспорта наноразмерной присадки из объема смазочного материала к поверхностям трения.

Материалы и методы. В качестве смазочных материалов (СМ) были использованы промышленные масла И20-А, И40-А (ГОСТ 20799-88), вазелиновое масло (ГОСТ 3164-78), ВНИИ НП-406 (ТУ 38.101289-72). В качестве присадки вводились многостенные углеродные нанотрубки Таунит-М (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов). В качестве абразивного материала использовался Электрокорунд 25А 0,063-0,125 (F180).

Для экспериментальных исследований физико-химических свойств суспензий использовали методы ротационной вискозиметрии (вискозиметр Brookfield DV2), оптической спектрофотометрии (спектрофлуориметр Solar CM 2203). Трибологические испытания производились на испытательных машинах трения МТУ-01 и СМЦ-2. Суспензии углеродных нанотрубок в смазочных материалах подготавливались при помощи механического перемешивания и ультразвукового диспергирования в течение 15 минут.

Результаты и их обсуждение.

Установлено, что суспензии, прошедшие ультразвуковую диспергацию в течение 15 минут, проявляют высокую стабильность. Оптическая плотность образцов, измеренная спектрофотометрическим способом, изменяется не более, чем на 20% после отстаивания в течение 168 часов.

Реологические испытания методом ротационной вискозиметрии позволили установить, что введение углеродных нанотрубок в СМ незначительно увеличивает кинематическую вязкость суспензий, при этом зависимость вязкости от концентрации носит экспоненциальный характер. Следует отметить, что введение присадки не изменяет характер течения СМ.

По результатам испытаний на машине трения МТУ-01 (схема пары трения «кольцо-диск»), установлено, что модификация промышленных жидких СМ, а также модельной смазочной системы на основе вазелинового масла многостенными углеродными нанотрубками приводит к незначительному увели-

чению коэффициента трения композиций, что может быть связано с высокой жесткостью и упругими свойствами нанотрубок.

В результате лабораторных испытаний жидких смазочных материалов, загрязненных абразивными частицами и модифицированных углеродными нанотрубками, на машинах трения МТУ-01 (схема пары трения «три шарика по плоскости») и СМЦ-2 (схема пары трения «диск-диск») установлено снижение износа контактных поверхностей. В случае отсутствия в жидких СМ абразивных загрязнений происходит снижение величины износа поверхностей трения до 10%. Дополнительное введение абразивного загрязнителя увеличивает эффективность присадки.

Углеродные нанотрубки оказывают экранирующее действие и снижают режущее действие абразивных частиц. «Таунит», обладая достаточно большой жесткостью и малыми размерами, закрепляясь на частицах абразива, демпфирует удар абразивной частицы о поверхность трения, переходя при этом непосредственно на саму поверхность. Лабораторные испытания загрязненных смазочных материалов с присадкой углеродных нанотрубок подтверждают данную гипотезу: эффективность снижения величины износа изменяется от 15% в случае применения модифицированного жидкого смазочного материала (ВНИИ НП 406) до 30% при применении промышленных масел (И20 и И40).

Исследование температурных зависимостей, полученных в результате лабораторных испытаний суспензий, позволяет сделать вывод о том, что модификация СМ углеродными нанотрубками увеличивает теплопроводность суспензий, что способствует эффективному отводу тепла из контактной зоны.

1. Парфенов А. С., Туvin А. А. Снижение износа кулачкового механизма ткацкого станка за счет применения смазочных материалов с наноразмерной присадкой // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности — 2022 (397), № 1, 282—287
2. Парфенов А. С., Волков А. В., Березина Е. В., Годлевский В. А. Адсорбционная модель мезоморфного граничного смазочного слоя, образуемого наноразмерной присадкой в трибосистеме с абразивным износом // Жидк. крист. и их практич. использ. — 2022 (22), № 1, 76–83
3. Шилоv М. А., Смирнова А. И., Столбов Д. Н., Усольцева Н. В. Моделирование деформационных процессов углеродных нанотрубок // Жидк. крист. и их практич. использ. — 2020 (20), № 1, 85–91

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ И НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.С. Петровская, Д.Л. Радюкевич, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик

Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; agata.petrovskaya@gmail.com

Введение. В настоящее время для создания раневых покрытий широко используются полимерные материалы. Наиболее перспективным является био-совместимый и биodeградируемый полимер хитозан. Однако, раневые повязки на основе материалов природного происхождения, обладающие необходимыми биологическими свойствами и влияющие на функцию клеток, ограничены плохими механическими свойствами и быстрыми профилями деградации, в то время как, использование синтетических полимеров, таких как поливиниловый спирт (ПВС), обеспечивает механическую прочность, но недостаточные биоактивные свойства [1, 2]. Модификация полимеров с использованием неорганических наночастиц может привести к образованию биоматериалов с улучшенными механическими и антибактериальными свойствами [1]. Таким образом, разработка композиционных полимерных покрытий различного состава и их исследование является важной задачей при получении антибактериальных материалов биомедицинского назначения.

Методы и материалы. Однослойные и многослойные пленки хитозана, ПВС, и композиционные с наночастицами Al_2O_3 ($d = 30-60$ нм; Sigma-Aldrich, China) были получены методом спин-коатинга путем смешения раствора полимера с концентрацией 1 мг/мл с 0,65 % суспензией наночастиц [3].

Измерения модуля упругости (E) и силы адгезии (F_{adh}) проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 (ОДО «Микротестмашини», Республика Беларусь). Использовали кремниевые кантилеверы FMG01 (TipsNano, Эстония) с радиусом кривизны острия зонда $R = 10$ нм и константой жесткости консоли $k = 3$ Н/м. Модуль упругости и силу адгезии рассчитывали по модели Джонсона-Кенделла-Робертса.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований было установлено, что однослойные и многослойные пленки хитозана обладают наибольшими значениями модуля упругости: 1 слой — 704,4 МПа, 5 слоев — 921,5 МПа, 10 слоев — 803,2 МПа. Модуль упругости пленок ПВС значительно ниже и с увеличением количества слоев изменяется в пределах экспериментальной ошибки (табл. 1). Введение наночастиц Al_2O_3 как в однослойные, так и в многослойные пленки хитозана приводит к уменьшению E . В случае пленок ПВС с Al_2O_3 зафиксированы незначительные изменения модуля упругости в пределах экспериментальной

ошибки, $\pm 10\%$ (табл. 1). Следует также отметить, что пленки ПВС, хитозана с Al_2O_3 и ПВС с Al_2O_3 обладают близкими значениями модуля упругости.

Таблица 1. Значения модуля упругости и силы адгезии композиционных полимерных пленок

Образец	1 слой		5 слоев		10 слоев	
	E , МПа	F_{adh} , нН	E , МПа	F_{adh} , нН	E , МПа	F_{adh} , нН
Хитозан	704,4	31,8	921,5	16,8	803,2	26,1
ПВС	509,5	26,0	436,3	20,2	511,8	19,9
Хитозан + Al_2O_3	509,6	37,6	542,6	35,4	471,3	26,9
ПВС + Al_2O_3	491,3	21,0	559,0	29,3	415,2	19,8

Немаловажной характеристикой поверхности материала является и сила адгезии. Установлено, что введение наночастиц в однослойные полимерные пленки приводит к возрастанию силы адгезии до 37,6 нН, в случае пленки хитозана, и снижению значений F_{adh} до 21,0 нН, в случае ПВС. После введения Al_2O_3 в многослойные пленки наблюдается увеличение значений силы адгезии (5 слоев), для 10-слойных покрытий изменений F_{adh} зафиксировано не было (табл. 1).

Заключение. Методом АСМ были исследованы механические свойства композиционных полимерных покрытий. Установлено, что введение наночастиц Al_2O_3 снижает модуль упругости в случае покрытий на основе хитозана и не оказывает влияния в случае пленок ПВС. Следует также отметить, что все исследуемые покрытия на основе хитозана обладают более высокими значениями силы адгезии, чем пленки на основе ПВС.

Благодарность. Работа выполнена в рамках договора с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований № T21M-051 от 01.07.2021.

1. Винник Ю. С. [и др.] Современные раневые покрытия в лечении гнойных ран // Новости хирургии. — 2015 (23), № 5, 552—558.
2. Kraskouski A. [et al.] Polyvinyl alcohol and pectin blended films: preparation, characterization and mesenchymal stem cells attachment // Journal of Biomedical Materials Research Part A. — 2021 (109), № 8, 1379—1392.
3. Петровская А. С. [и др.] Получение композиционных покрытий на основе водорастворимых полимеров и неорганических наночастиц оксида алюминия методом // Приборостроение-2021: материалы 14-й Международной научно-технической конференции. — Минск: БНТУ, 2021, 320—321.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦЕ «МИНЕРАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ – СВЯЗУЮЩЕЕ» ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ СОСТАВОМ ГИДРОФОБНЫМ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМ

В.В. Петрусевич

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь;
petrusevichvv@gmail.com

Необходимость определения величины адгезионного взаимодействия между компонентами композиционных дорожно-строительных материалов представляет собой важную задачу для качественной и количественной оценки их физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств. Одним из критериев оценки адгезии является анализ взаимодействия в системе «минеральный материал – связующее».

В данной работе проведено исследование отрыва склеенных битумом БД 60/90 чистых и обработанных гранитных образцов размерами 5×3×1 см составом гидрофобным профилактическим ПРОТЕКТ-01 [1, 2]

Состав гидрофобный профилактический ПРОТЕКТ-01 готовили путем совмещения навесок исходных компонентов в лабораторном лопастном смесителе в течение 30 минут при температуре 20 °С. Обработку трех образцов выполняли следующими его вариантами [3] (таблица 1).

Выполнение измерений осуществляли путем разрыва двух склеенных образцов на испытательной машине WDW-100E (рисунок 1).

Таблица 1. Составы композиций, мас. %

Компонент	Варианты составов		
	1	2	3
Связующее	60	65	70
Минеральный наполнитель	14	12	10
Растворитель	16	13	10
Гидрофобизатор	10	10	10



Рис. 1. Проведение эксперимента на испытательной машине WDW-100E

Таблица 2. Результаты испытаний

Варианты образцов	Значение по результатам испытаний на испытательной машине WDW-100E, кН		
	1	2	3
Образцы 1 (обработаны вариантом №1)	0,105	0,10	0,11
Образцы 2 (обработаны вариантом №2)	0,11	0,12	0,115
Образцы 3 (обработаны вариантом №3)	0,103	0,10	0,10
Образцы 4 (чистые)	0,9	0,87	0,88

Полученные результаты измерений представлены в таблице 2.

Анализ результатов исследований позволяет утверждать, что состав гидрофобный профилактический влияет на величину адгезионного взаимодействия в системе «минеральный материал-связующее». Лучшие показатели наблюдались у образцов, обработанных вариантом №2, ввиду оптимального количества связующего и минерального наполнителя в составе композиции. У образцов 3 результаты ниже, чем у остальных обработанных ввиду большего количества минерального наполнителя.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

– представленные в работе результаты экспериментальных исследований позволили количественно оценить и сравнить адгезионное взаимодействие битума и гранитных образцов (чистых и обработанных составом гидрофобным профилактическим ПРОТЕКТ-01);

– наблюдался когезионный тип отрыва битума от обработанных гранитных образцов;

– значения результатов испытаний на испытательной машине WDW-100E у обработанных образцов выше на 10—20%, чем у чистых.

1. Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: заявка на патент Респ. Беларусь № а 20180114; МПК7 C08L95/00, C09D195/00, C09K3/18, E01H10/00 / Д.И. Бочкарев, В.В. Петрусевич; заявитель Д.И. Бочкарев, В.В. Петрусевич. – № а 20180114; заявл. 23.03.18; опубл. 30.10.19 // Афицыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019. – № 5. – С. 20.
2. Состав гидрофобный профилактический ПРОТЕКТ-01: Технические условия ТУ ВУ 192670194.002-2019. – Введ. 03.10.2019 – Гомель: Белорус. гос. ун-т трансп. – 2019. – 29 с.
3. Подбор оптимального состава профилактической обработки и анализ его влияния на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В.В. Петрусевич // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 73–77.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА МАРКИ 273-83

Е.С. Петухова, А.Л. Федоров, А.Г. Аргунова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия; evgsp@rambler.ru

В условиях городского округа Якутск Республики Саха (Якутия) на открытом испытательном полигоне Института проблем нефти и газа СО РАН проведены длительные климатические испытания полиэтилена марки 273-83 (ПАО «Казаньоргсинтез»), содержащих стабилизаторы марок СО-3, СО-4, Стафен (Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова). Испытания проводили в период с 14.07.2017 по 14.07.2019 с этапами выемки после 1, 3, 6, 9, 12, 18 и 24 месяцев экспонирования. Для сравнения композиты аналогичного состава хранили в закрытом отапливаемом помещении. Контроль свойств осуществляли при внешнем осмотре, определяли физико-механические характеристики (ГОСТы 11262-17 и 9550-81) и плотность (ГОСТ 15139-69), структурные исследования методами сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии.

Наиболее чувствительным параметром к воздействию естественных климатических факторов, выявлено удлинение при разрыве (табл. 1).

Таблица 1. Удлинение при разрыве ПЭ марки 273-83, содержащего стабилизирующие добавки, после экспонирования на открытом испытательном полигоне

Срок экспон-я, мес.	273-83	0,5 мас.% СО-3	0,5 мас.% СО-4	0,5 ас.% Стафен
0	1016	994	964	1017
1	1016	1049	1013	964
3	919	922	984	894
6	817	815	786	809
9	974	947	879	247-885
12	18-889	859	921	9-41
18	1-3	3-4	6-77	1-2
24	Хрупкое разрушение			

Установлено, что образцы, стабилизированные СО-3 и СО-4, сохраняют стабильность свойств вплоть до 12 месяцев экспонирования, в то время как образцы исходного полиэтилена и содержащего стабилизатор Стафен к 12 месяцам экспонирования охрупчиваются.

При внешнем осмотре уже после 1 месяца было выявлено изменение окраски образцов, содержащих стабилизаторы СО-3 и СО-4, проявивших наилучшую эффективность, с белой до желто-коричневой. Для установления механизмов протекающих реакций были проведены исследования стабилизатора СО-4 предварительно интенсивно облученного под источником УФ-излучения (лампа ДРЛ-1000, имеющая поток излучения в диапазоне 240—320 нм 128 Вт) в течение 6, 12, 18 и 24 часов.

Установлено, что с увеличением продолжительности облучения интенсивность окрашивания стабилизатора СО-4 возрастает со светло-бежевой до темно-коричневой. ИК-спектроскопические исследования облученного стабилизатора позволили установить механизмы протекающих реакций. В первую очередь, при УФ-воздействии на стабилизатор СО-4 (бис 3,3'-[(3,5-ди-третбутил-4-гидроксифенил)-пропил] дисульфид) происходит обрыв дисульфидной связи с образованием тиольных радикалов. Затем активный тиольный радикал превращается в тиол за счет атома водорода ОН-группы ароматического кольца СО-4. Далее феноксильный радикал диспропорционирует с образованием хинонметидов и фенола. Хинонметиды способны к димеризации с образованием димерных продуктов. Первичное изменение окраски стабилизатора вероятнее всего происходит на стадии диспропорционирования, когда белая окраска сменяется на бежевую. Дальнейшее, более интенсивное, окрашивание связано с димеризацией хинонметидов. Полученный результат хорошо согласуется с имеющимися литературными данными [1—3].

Таким образом, проведены длительные климатические испытания стабилизированного полиэтилена, показана эффективность применения серосодержащих пространственно-затрудненных фенолов (СО-3 и СО-4). Недостатком данных стабилизирующих добавок является изменение окраски под воздействием УФ-излучения, причиной которой, как показали ИК-спектроскопические исследования, является образование димерных хинонметидов, в связи с чем введение данных стабилизаторов рекомендуется в окрашенные (черные) изделия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9, FWRS-2021-0004 с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

1. Pawelec W., Holappa A., Tirri T., Aubert M., Hoppe H., Pfaendner R., Wilén C.-E. Disulfides – Effective radical generators for flame retardancy of polypropylene // Polymer Degradation and Stability. – 2014. – Vol. 110. – P. 447–456. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.013.
2. Рогинский В. А. Пространственно-затрудненные фенолы – антиоксиданты для полиолефинов. Связь антиокислительной активности со строением (обзор) // Высокомолекулярные соединения. – 1982. – Т. 24. – № 9. – С. 1808–1827.
3. Turner A. B. Quinone methides // Quarterly Reviews, Chemical Society. – 1964. – Vol. 18. – P. 347–360.

СТРУКТУРА А-С ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ СЕПАРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Д.Г. Пилипцов¹, А.С. Руденков¹, А.В. Рогачев¹, С.Ю. Чепкасов²

¹Гомельский государственный университет имени Ф.Скорины, Гомель, Беларусь pdg@mail.ru

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Углеродные покрытия, получаемые с использованием вакуумного импульсного разряда, широко применяются в машиностроении в качестве защитных и упрочняющих покрытий узлов трения и инструмента. В машиностроении наличие макрочастиц на поверхности покрытия и в его объёме не является катастрофическим параметром, приводящим к существенному снижению эксплуатационных параметров. С учетом перспективы применения данных покрытий в оптике, микроэлектронике, а также расширения круга задач, в которых необходимо осажждать углеродные покрытия очень малых толщин (не более 20 нм), характеризующихся высокой однородностью структуры, оптической прозрачностью в видимом диапазоне, актуальной задачей является разработка методов снижения макрокапельной компоненты в потоке углеродной плазмы и повышении энергетической однородности ионного потока. Оптимальным способом разделения капельной и ионной компоненты потока является использование устройств, осуществляющих транспортировку плазменного потока по криволинейной траектории с разделением на ионную (заряженную) и капельную (нейтральную) компоненты.

Целью данной работы является исследование влияния плазменного сепаратора с открытой геометрией, расположенного внутри вакуумной камеры и выполненного в виде четверти тора, на формирование структуры а-С покрытий.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на спектрометре T64000 (Horiba-Jobin Yvon, Франция) изучена структура покрытий. Спектры возбуждались лазерным излучением с длиной волны 514,5 нм и мощностью 3 мВт. Поверхность образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением прибора JSM-6700F (JEOL, Япония). Состав химических связей в покрытии исследовался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием PHI Quanta (Япония). Морфологию поверхности покрытий изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режимах измерения топографии и фазового контраста (Solver-PRO P47, NT-MDT, Россия).

РФЭС показала, что осаждение покрытий из сепарированной плазмы импульсного разряда приводит к увеличению концентрации Csp^3 компоненты, что связано с формированием более однородной

структуры покрытия и согласуется с результатами исследований, выполненных методами АСМ и СЭМ. Анализ спектров КРС показал, что в структуре а-С покрытий, осажденных из сепарированного потока, наблюдается увеличение количества атомов углерода в состоянии sp^3 -гибридизованными связями, но при этом наблюдается увеличение размера Csp^2 кластеров.

Методом СЭМ установлено наличие на поверхности а-С покрытия, осажденного без использования сепаратора, значительного количества частиц размером до 150 нм. Площадь, занимаемая этими макрочастицами, может достигать 50% от площади подложки. При использовании фильтра наблюдается полное отсутствие частиц на поверхности подложки. Показано, что используемый сепаратор удаляет все крупные нейтральные частицы, а в случае образования заряженных макрочастиц транспортирующее магнитное поле не позволяет удерживать их в потоке за счет низкого отношения заряд/масса, за счет чего происходит их удаление из потока. На снимках АСМ наблюдается формирование более гладкой поверхности и происходит значительное снижение шероховатости в 2 раза в сравнении с покрытиями, осажденными из потоков без сепарации. Поверхность покрытия, осажденного без сепарации характеризуется среднеквадратичной (RMS) шероховатостью, равной 2,8 нм, при этом наблюдается большое количество мелкодисперсных включений с размером зерна 11,5 нм. Применение сепаратора приводит к формированию покрытий с меньшим размером зерна (5,7 нм). Изображения фазового контраста показали, что при использовании сепарации фазовый состав поверхности более однородный, и отсутствуют включения, характеризующиеся другим фазовым составом. Согласно данным АСМ и СЭМ, можно сделать вывод, что очень тонкие покрытия, полученные при этих условиях осаждения, являются атомарно гладкими и однородными.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 3.1.03). Авторы выражают благодарность ЦКП "ВТАН" НГУ за измерения на спектрометре T64000.

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы/ под ред. А.В.Рогачева— М.: Радиотехника, 2020

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПЛАНАРНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.С. Руденков, А.А. Серeda

Гомельский государственный университет имени Ф.Скорины, Гомель, Беларусь rudenkov@gsu.by

Углеродные покрытия характеризуются уникальным комплексом физико-химических свойств и получили широкое распространение в различных сферах промышленности [1]. Формирование износостойких покрытий на основе углерода с заданной топографией поверхности является одной из актуальных задач. В настоящее время существует два подхода, позволяющие получить наноструктурированные покрытия: формирование структурированного рельефа путем образования наноструктур в процессе осаждения покрытия [2] и обработка поверхности уже сформированного покрытия с помощью фемто- или наносекундного лазера [3]. Авторами [3] показано, что создание на поверхности углеродных покрытий сетки ямок в результате кратковременного воздействия лазерного излучения существенно улучшает их триботехнические свойства.

Целью настоящей работы является разработка комбинированной методики формирования планарно-структурированных углеродных покрытий из продуктов лазерного диспергирования полимерных материалов и импульсной катодной углеродной плазмы, а также определение влияния природы прекурсора углерода на их морфологию.

Образцы планарно-структурированных углеродных покрытий формировались в два этапа: на первом этапе на кремниевую подложку осаждались продукты лазерного диспергирования композиционной мишени на основе различных прекурсоров углерода (политетрафторэтилен, целлюлоза, нанокристаллическая целлюлоза, поликапролактан) и формиата свинца $Pb(HCOO)_2$, на втором – на ранее полученные слои осаждались углеродные покрытия из плазмы импульсного катодно-дугового разряда.

Для лазерного диспергирования композиционной мишени использовался наносекундный лазер L-2137U+HG-5 (длина волны — 532 нм, энергия лазерного импульса 450 мДж). Формирование углеродных слоев осуществлялось при следующих режимах: 2500 импульсов, частота следования импульсов — 5 Гц, напряжение разряда — 350 В. Техническое решение заключается в осаждении наночастиц металлов и их оксидов на подложке перед нанесением углеродных слоев и сочетает в себе принцип наноструктурирования рельефа покрытия за счет предварительного создания определенной текстуры поверхности благодаря морфологическим особенностям подслоев и модифицирование покрытия в процессе формирования за счет фазовых трансформаций углерода.

Ранее [2] нами показано, что наличие формиата свинца в композиционной мишени вносит существен-

ный вклад в процессы структурообразования углеродных слоев. В данной работе определено влияние различных прекурсоров углерода на морфологию формируемых планарно-структурированных покрытий. Показано (рис. 1), что наиболее развитой морфологией обладают углеродные покрытия, сформированные на поверхности слоев, осаждаемых из продуктов диспергирования мишени на основе целлюлозы.

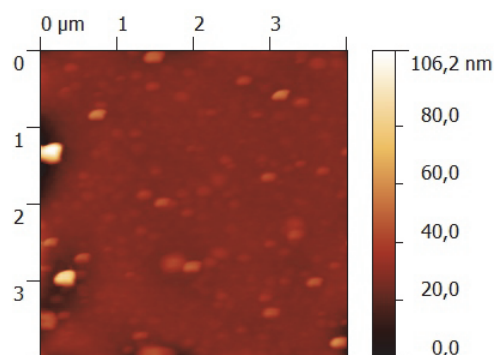


Рис. 1. Топография поверхности углеродных покрытий

Показано, что данные слои характеризуются наименьшим средним диаметром отдельных структурных образований (90–100 нм) их высоким числом, относительно низкой шероховатостью ($R_{ms} = 5,5$ нм) и обладают наиболее мелкодисперсной структурой из рассматриваемых образцов. Также низкой шероховатостью обладают слои на основе поликапролактана, однако, размер отдельных структурных в данном случае значительно выше, а их число гораздо меньше, чем в случае использования целлюлозы.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР «Разработка основ комбинированной технологии формирования планарно-структурированных углеродных покрытий из импульсной катодной углеродной плазмы и продуктов лазерного диспергирования полимерных материалов», комплексное задание 1.12, ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций».

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / Д.Г. Пилипов, А.С. Руденков, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Цзян Сяо Хун, Чжоу Бин. – 2020. – М.: Радиотехника. – 283 с.
2. Руденков А.С. Морфология и фазовый состав наноструктурированных углеродных покрытий, сформированных на подслое, содержащем политетрафторэтилен и формиат свинца // Проблемы физики, математики и техники. – 2021 (49), № 4, 38–44.
3. Kennedy F.E. Tribological behavior of hard carbon coatings on steel substrates // Wear. – 2003 (255), 854–858.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Д.В. Сапсалёв¹, Г.Б. Мельникова², С.А. Чижик²

¹Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Минск, Беларусь;

dsapsalev@list.ru

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Актуальным является получение новых материалов на основе биополимеров с целью замены синтетических полимерных соединений в различных отраслях науки и техники [1]. Введение неорганических наночастиц в структуру полимерной матрицы позволяет получать материалы с принципиально новыми свойствами и требуемыми эксплуатационными характеристиками [2].

Цель: изучение структурно-морфологических характеристик композиционных покрытий на основе желатина с неорганическими наночастицами, сформированных методом спин-коатинга.

Материалы и методы. Тонкие пленки на основе желатина (Sigma-Aldrich, G9391, Type B) формировали на предварительно гидрофилизованных в пероксидно-аммиачной смеси кремниевых подложках (ориентация 111, линейные размеры: 1,5×1,5 см) из водного раствора с концентрацией 0,0625 мг/мл.

В состав полимерных покрытий вводили наночастицы диоксида кремния (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{—}20$ нм), оксида алюминия (раствор 20 массовых %; Sigma-Aldrich, $d = 30\text{—}60$ нм, $\rho = 1,06$ г/см³) и оксида цинка (Sigma-Aldrich, $d < 100$ нм). Для этого водный раствор желатина ($c = 0,125$ мг/мл) смешивали с суспензиями наночастиц различных концентраций в объёмном соотношении 1 : 1. Содержание наночастиц в суспензии для формирования композиционных пленок подбирали экспериментально, исходя из выполнения условия образования стабильной взвеси наночастиц после ультразвуковой обработки (10 мин). Далее по тексту указано содержание наночастиц в пересчете на 1 мг желатина.

Для реализации метода спин-коатинга аликвоту раствора желатина или суспензии желатин-наночастицы объемом 10 мкл прикапывали на подложки, вращающиеся со скоростью 3200 об/мин. Вращение не прекращали в течение 1 мин для удаления растворителя.

Исследование структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов FMG 01 (TipsNano, Российская Федерация) со средней жесткостью 3 Н/м. Область сканирования 5×5 мкм.

Результаты и их обсуждение. Согласно данным АСМ, формирование тонких пленок желатина из раствора с концентрацией 0,0625 мг/мл позволяет получать плотные однородные покрытия с неболь-

шим количеством дефектов. Установлено, что композиционные покрытия желатина с неорганическими наночастицами характеризуются структурой с более развитой поверхностью, что подтверждается увеличением значений R_a и R_q сформированных покрытий.

Так, введение используемых в работе наночастиц приводит к увеличению параметров шероховатости по сравнению с исходными пленками желатина ($R_a = 0,41$; $R_q = 0,56$ нм). Параметры R_a и R_q композиционных покрытий достигают максимальных величин при следующих значениях содержания наночастиц в структуре полимерной матрицы 2 мг (SiO₂); 17 мг (Al₂O₃); 8 мг (ZnO) и составляют 1 и 1,22 нм (SiO₂); 0,76 и 0,96 нм (Al₂O₃); 0,45 и 0,66 нм (ZnO) соответственно. Дальнейшее увеличение содержания наночастиц приводит к снижению наношероховатости композиционных покрытий, что обусловлено встраиванием частиц наномодификатора и их агломератов в структуру сетки желатина, заполнением собственных дефектов полимерной пленки.

Последующее повышение содержания наночастиц приводит к увеличению значений R_a и R_q вследствие формирования достаточно больших агломератов на поверхности покрытий. Установлено, что характер изменения параметров шероховатости не зависит от типа наночастиц, а определяется концентрацией нанонаполнителя.

Заключение. Методом спин-коатинга были сформированы композиционные полимер-неорганические пленки на основе желатина с наночастицами диоксида кремния, оксида алюминия и оксида цинка. Установлено, что введение наночастиц в структуру желатиновой матрицы позволяет формировать покрытия с более развитой поверхностью. Такой тип модификации существенно расширяет ассортимент функциональных материалов на основе желатина.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (№ ГР 20220451) и ГПНИ на 2021–2025 гг. "Энергетические и ядерные процессы и технологии", подпрограммы "Энергетические процессы и технологии" (задание 2.25).

1. Subhadeep Biswas, Anjali Pal. Application of biopolymers as a new age sustainable material for surfactant adsorption: A brief review // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. – 2020 (2), 100145
2. Zhi Yang, Sahraoui Chaieb, Yacine Hemar. Gelatin-Based Nanocomposites: A Review // Polymer reviews. – 2021(61), № 4, 765–813

КОМПОЗИТЫ ФУМАРАТА ЦИРКОНИЯ И ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ АДсорбЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Д.Ю. Сахаревич^{1,2}, В.В. Паньков¹, Т.Г. Шутова²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²ГНУ “Институт химии новых материалов НАН Беларуси”, Минск, Беларусь, shutova@ichnm.by

Металлоорганические координационные полимеры (МОКП) отличаются не только высокой пористостью, определяющей их уникальные адсорбционные свойства, но и высокой дисперсностью получаемых в ходе синтеза порошков. Для практического применения МОКП, как правило, смешивают со связующими (полимерами, мезопористым оксидом алюминия и др.) и формуют в гранулы, таблетки или pellets, ухудшая при этом адсорбцию по сравнению с исходным порошком. Композиты МОКП с полиэлектролитами (ПЭ) сохраняют уникальные свойства порошков МОКП [1], а ПЭ сетка может добавить им механической прочности.

Цель: получить композиты фумарата циркония (Zr-Fum), модифицированного мультислойной оболочкой, и изучить влияние ПЭ на водопоглощение композитов и прочность таблеток.

Материалы и методы. Zr-fum синтезировали из 1,34 г хлорокси циркония (IV) и 1,45 г фумаровой кислоты в 15% муравьиной кислоте, смесь кипятили 24 ч. Осадок промывали 50 % спиртом, ацетоном и сушили при 65 °С.

Оболочки из двух бислоев полистиролсульфонат натрия / полидиаллилдиметиламмоний хлорид (ПСС/ПДДА) и карбоксиметилцеллюлоза / хитозан (КМЦ/ХН) формировали на частицах Zr-fum методом послойной сборки [1]. К суспензии Zr-fum (100 мг/мл) добавляли аликвоту 50 мас.% раствора ПСС или КМЦ, масса ПЭ в которой составляла ¼ от массы оболочки, и обрабатывали ультразвуком 60 с. Аналогично без промежуточной отмывки добавляли ПДДА или ХН. Таблетки (~0,19 г) формовали в пресс-форме диаметром 6 мм усилием 2 т. Прочность таблеток на сжатие оценивали на портативном тестере прочности Electrolab EH01P. Водопоглощение композитов характеризовали на анализаторе влажности MAX 50, Radwag, Польша после 24 ч выдержки при заданной влажности (RH) и температуре (термогигрометр ТКА-ПКМ).

Результаты и их обсуждение. Для порошков с массовой долей ПЭ (ω) от 9 до 50 % сохраняется характерная для исходного МОКП S-образная изотерма сорбции водяного пара. В диапазоне RH = 20—75% водопоглощение не зависит от ω и составляет 327 ± 26 мг/г. При RH 90% адсорбция паров композитами достигает 500—900 мг/г и зависит от ω и полиэлектролитного комплекса (рис. 1).

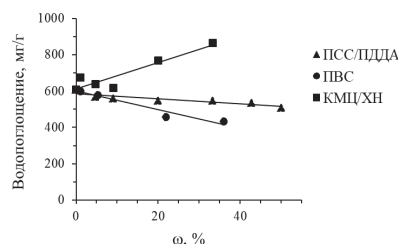


Рис. 1. Зависимость водопоглощения композитов Zr-fum/ПЭ от массовой доли ПЭ. RH = 90%, T = 18 °С

Прессование приводит к необратимому уменьшению водопоглощения при RH 90%, особенно для таблеток Zr-fum и композитов с ПСС/ПДДА при $\omega < 30\%$, что связано с аморфизацией и механическим нарушением пористой структуры МОКП под давлением [2]. Для композитов с $\omega = 30 \div 50\%$ изменение водопоглощения таблеток относительно порошка не настолько существенно; увеличение массы ПЭ нивелирует разрушение пористой структуры.

При добавлении всего 1% полиэлектролитного комплекса КМЦ/ХН к Zr-fum достигается упрочнение таблеток на 53%, а затем с ростом ω их прочность снижается (рис. 2), тем не менее, при $\omega = 33\%$ она на 30% выше, чем для Zr-fum. В случае поливинилового спирта (ПВС), который часто используется в коммерческих таблетках, прочность композита по сравнению с немодифицированным МОКП увеличивается только при $\omega > 36\%$. Положительного влияния ПСС/ПДДА на прочность таблеток композитов не обнаружено.

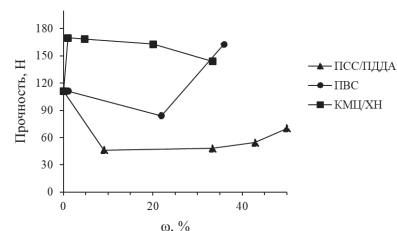


Рис. 2. Влияние ω на прочность таблеток Zr-fum/ПЭ

- Shutava T., Jansen C., Livanovich R., Pankov V., Janiak C. Metal organic framework/polyelectrolyte composites for water vapor sorption application // Dalton Transactions. — 2022 (51), №18, 7053—7067.
- Feng L., Wang K., Day G., Ryder M., Zhou H. Destruction of Metal–Organic Frameworks: Positive and Negative Aspects of Stability and Lability // Chem. Rev. — 2020 (120), №23, 13087—13133.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АПП

К.А. Саховский¹, Д.Г. Пилипцов², А.Н. Попов¹¹ Белорусский государственный университет транспорта, Гомель² Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, sakhovskij.kirill.07@gmail.com

Алмазоподобные углеродные (АПП) покрытия широко используются в машиностроении. Покрытия данной группы возможно формировать различными вакуумными методами. При этом как показано в [1], структура, а следовательно, и механические свойства зависят от условий и режимов осаждения, температуры подложки. Наиболее важным параметром является энергия ионов углерода, которую возможно регулировать, например подавая на подложку потенциал смещения, изменяя параметры разряда (напряжения, длительности). Одним из широко используемых методов формирования АПП является импульсный катодно-дуговой разряд, позволяющий осаждать покрытия с высоким содержанием атомов углерода с sp^3 гибридизацией связей.

Целью данной работы является установление влияния параметров разряда на структуру и механические свойства, осажденных АПП.

Методика получения и исследования. АПП осаждали из импульсных потоков углеродной плазмы, которая генерировалась из области катодных пятен, возникающих на торце графитового катода в результате развития сильноточного импульсного вакуумно-дугового разряда между графитовым (распыляемым) катодом и анодом. Покрытия осаждали на полированные кремниевые подложки при температуре 23°C. Осаждение покрытий проходило при различных напряжениях импульсного дугового разряда (таблица 1) и постоянной частоте следования импульсов разряда 5 Гц. Количество импульсов, определяющее толщину покрытия, составляло 5000. Методом КР спектроскопии (Sentra 2, Bruker) изучена микроструктура покрытий. КР спектры в диапазоне от 950 до 2200 cm^{-1} возбуждались лазерным излучением с длиной волны 532 нм и мощностью 20 мВт. Твердость и модуль упругости определяли с использованием нанотвердомера «НаноСкан-4Д», при максимальной нагрузке на индентор 40 мН. Триботехнические испытания проводили по схеме «сфера-плоскость» при возвратно поступательном перемещении индентора (ШХ 15, диаметр 5 мм) при нормальной нагрузке 1 Н, температуре окружающей среды 23 °С, относительной влажности 70 % и скорости 67,5 мм/с.

Результаты и их обсуждение. Методом КР спектроскопии установлена зависимость микроструктуры покрытий от напряжения разряда: при низких напряжениях разряда (до 250 В) величина отношения I_D/I_G достигает максимальных значений, что указывает на высокую концентрацию ароматических колец, при увеличении напряжения до 300 В происходит резкое снижение отношения I_D/I_G до минимальных значений, при дальнейшем увеличении напряжения разряда (350 В и выше) происходит незначительный рост I_D/I_G отношения, который

определяется увеличением количества ароматических колец в структуре покрытий. Установленное смещение G пика в направлении более высоких волновых чисел с ростом напряжения разряда совместно со снижением отношения I_D/I_G указывает на увеличение sp^3 связей в покрытии. Комплексный анализ параметров КР спектров позволяет сделать вывод о формировании структуры с высоким содержанием sp^3 атомов углерода при напряжении разряда 300 В и 350 В.

Результаты определения механических свойств приведены в табл. 1. Установлено, что изменения твердости и модуля упругости соответствуют изменению микроструктуры и достигают максимальных значений при напряжении разряда 300 В и 350 В. Известно [1], что твердость АПП зависит от отношения sp^2/sp^3 атомов углерода и размера углеродного кластера.

Таблица 1. Механические свойства АПП

Напряжение разряда, В	Твердость Н, ГПа	Модуль упругости Е, ГПа	Коэффициент трения μ	Коэффициент объёмного износа контртела j , $\times 10^{-12} m^3/(N \times m)$
200	13,8	165,3	0,18	1,04
250	14,3	162,9	0,13	5,25
300	20,8	191,4	0,09	1,92
350	29,9	188,3	0,17	0,73
400	22,2	202,0	0,14	11,71
450	17,3	184,1	0,12	5,25

Параметры трения зависят как от твердости подложки с осажденным покрытием, так и от шероховатости покрытия. Стоит отметить, что при высоких значениях напряжения разряда в потоке углеродной плазмы формируется большое количество макрочастиц, которые при их конденсации на подложке значительно увеличивают шероховатость и снижают прочность системы «подложка-покрытие» за счет формирования многочисленных границ раздела в объёме покрытия. При этом такие частицы в процессе трения могут выкрашиваться/разрушаться, что приводит к формированию не однородной поверхности покрытия, которая, работая как абразив приводит к росту износа контртела.

Заключение. Определены оптимальные режимы работы испарителя, при которых формируются покрытия с высокой концентрацией sp^3 фазы и высокими механическими свойствами.

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / под ред. А.В.Рогачева – М.: Радиотехника, 2020

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ДИАМИНА НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРИМИДОВ В ПРОЦЕССЕ ДЕГИДРАТАЦИИ ИЗОПРОПАНОЛА МЕТОДОМ ПЕРВАПОРАЦИИ

А.Е. Солдатова¹, Т.В. Плиско², А.М. Орлова¹,
А.А. Кузнецов¹, Е.С. Бурть², А.В. Бильдюкевич²

¹Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова, Москва, Россия;
soldatova.anastasia92@gmail.com

²Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, plisko.v.tatiana@gmail.com

Ароматические полиэфериимиды (ПИ) – класс полимеров, обладающих уникальными свойствами: высокие термо-, термостойкость, механические свойства, радиационная стойкость, возможность эксплуатации в широком температурном диапазоне и т.д.. ПИ являются перспективными полимерами для получения на их основе мембран для газоразделения и первапорации.

Цель работы - изучение влияния химического строения диамина на транспортные свойства мембран на основе ПИ при разделении смеси 88 мас.% изопропанол-12 мас.% вода методом вакуумной первапорации.

Материалы и методы. Были синтезированы и изучены линейные ароматические ПИ на основе 2,2-пропилидендифенилоксидафталевого диангидрида (диангидрида А) и диаминов различного строения (3,5-диаминобензойная кислота, 3,4-оксидианилин и м-толидин), свойства полученных ПИ сравнивали с ПИ маркой Ultem 1000®. Данные диамины были выбраны с целью получения ПИ, растворимых в легко кипящих растворителях, что необходимо для получения мембран методом инверсии фаз способом сухого формования. Для синтеза полиимидов был использован метод высокотемпературной каталитической поликонденсации в расплаве бензойной кислоты [1]. Структура синтезированных ПИ была доказана методами ИК и ¹H ЯМР спектроскопии, молекулярно-массовые характеристики были определены методом ГПХ, термические свойства изучены методами ТГА, ДСК и ТМА. На основе синтезированных ПИ были получены мембраны при использовании ТГФ и хлороформа в качестве растворителей. Транспортные свойства мембран исследовали в процессе вакуумной первапорации смеси 88% изопропанола-12% воды (Табл.1). Установлено, что мембрана на основе ПИ из 3,4-оксидианилина характеризуется самой высокой нормализованной удельной производительностью (J_N), содержанием воды в пермеате (Y_w) и нормализованным индексом эффективности первапорации (PSI_N). Мембраны на основе ПИ с другими исследованными диаминами демонстрируют близкие значения J_N , практически в 2 раза более низкие по сравнению с мембраной на основе ПИ из 3,4-оксидианилина. Выявлено, что

наличие гидрофильных фрагментов в диамине (карбоксильных групп или атома кислорода простой эфирной группы) приводит к повышению селективности процесса разделения за счет преимущественного транспорта воды через мембрану.

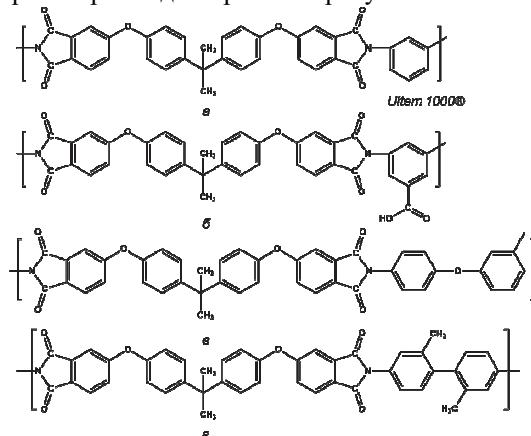


Рис. 1. Структуры Ultem 1000™ (а) и синтезированных полиимидов на основе различных диаминов: б — 3,5-диаминобензойная кислота, в — 3,4-оксидианилин, г — м-толидин

Таблица 1. Транспортные свойства мембран при первапорации смеси 88 мас.% изопропанола-12 мас.% воды

Диамин	J_N , кг м ⁻² ч ⁻¹	Y_w , wt. %	PSI_N , кг м ⁻² ч ⁻¹
м-фенилендиамин	1,15	74	23,0
3,5-диаминобензойная кислота	1,36	95	190,6
3,4-оксидианилин	2,76	97	725,8
м-толидин	1,04	68	15,2

Показано, что мембрана на основе ПИ из 3,5-диаминобензойной кислоты уступает в нормализованной удельной производительности мембране из ПИ из 3,4-оксидианилина из-за более плотной упаковки цепей полимера за счет образования водородной связи между карбоксильными группами.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№ 20-53-04022) и БРФИ (№Х21РМ-058).

1. Kuznetsov A. A. One-pot polyimide synthesis in carboxylic acid medium //High Performance Polymers. – 2000. – Т. 12. – №. 3. – С. 445.

МЕХАНИЗМЫ НАПРАВЛЕННОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ИМИДОСОДЕРЖАЩИХ ФТОРКОМПОЗИТОВ

В.А. Струк¹, Э.Т. Крутько², А.С. Антонов¹, А.Н. Лесун¹

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь; antonov.science@gmail.com;

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь

Введение. В конструкциях машин, механизмов, технологического оборудования широко применяют металлополимерные системы с элементами, изготовленными из композиционных материалов на основе промышленных термопластов, модифицированных функциональными компонентами, для обеспечения заданных параметров эксплуатационных характеристик. К числу наиболее распространенных композитов относят смеси, полученные термомеханическим совмещением матричного полимера и функционального модификатора, обеспечивающего достижение заданной структуры на молекулярном, надмолекулярном, межмолекулярном уровнях [1]. Среди смесевых композитов особый интерес представляют материалы на основе сочетания термопластичных матриц и сшивающихся модификаторов, способных направленно изменять структурные параметры композита [2].

Материалы и методика исследований. В качестве матричных компонентов использовали фторсодержащие полимеры (ПТФЭ). Для модифицирования термопластичных матриц использовали олигоимиды, выбранные из группы олигоимидоаминофенилен, олигогидроксималеимидофенилен, олигоаминофенилен, тетраимид, N,N'-бис-малеимиды ненасыщенных дикарбоновых кислот. Дисперсные частицы модификатора вводили при перемешивании в лопадном смесителе с матричным полимером (фторсодержащие полимеры Ф-4, Ф-4М и др.), подвергали смесь холодному прессованию с последующей горячей монолитизацией в течение 8—20 часов при температурах 330—380 °С с последующим охлаждением с заданной скоростью.

Исследование особенностей структуры композитов, содержащих имидные модификаторы, проводили с использованием современных методов анализа (ИК-спектроскопии, ДТА, АСМ, РЭМ, ТСТ).

Результаты и обсуждение. При введении олигоимидных компонентов в матрицу из фторсодержащего полимера наблюдается существенное изменение структуры композита, обусловленное особенностями переработки фторкомпозитов. В результате термической обработки композита в диапазоне температур 350—380 °С в течение 8—20 часов происходят процессы структурирования олигоимидов с образованием углеродсодержащих фракций, выполняющих функцию активного модификатора матричного полимера. Данные ИК-спектроскопии свиде-

тельствуют о протекании процессов сшивки по месту функциональных групп $>C=O$ и кратных $-C=C-$ связей, что согласно данным ДТА обеспечивает получение аддукта с высокой термостойкостью, которая превышает аналогичный показатель для исходных олигомеров и политетрафторэтилена. При этом возможно протекание процессов взаимодействия $-CF_2-$ групп ПТФЭ и функциональных групп, входящих в структуру олигомеров.

Исследования параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик фторкомпозитов, модифицированных имидсодержащими компонентами показали, что этот вид модификатора обеспечивает параметры характеристик, превышающие для композитов, содержащих 10–20 мас.% углеродного волокна, нашедших в настоящее время широкое применение в машиностроении [3].

Закключение. Многофакторный механизм модифицирующего действия имидсодержащих компонентов в термопластичных матрицах обусловлен реализацией феномена энергетического и технологического соответствия компонентов, реализуемых при получении композиционных материалов.

Благодарности. Исследования проводились в рамках выполнения комплексного задания 8.4.1.4 «Механизмы направленного структурообразования функциональных термопластичных композитов при энергетических и механических воздействиях» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021—2025 годы, а также комплексного задания 5.6 «Исследование процессов создания и использования полимерных упаковочных материалов для обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов» ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021—2025 годы.

1. Polymer Blends: Formulation and Performance, Volumes 1–2, Set / ed. by D.R. Paul, C.B. Bucknall. NY: Wiley-Interscience, 2000, 1224
2. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. — М.: Машиностроение. — 2005
3. Avdeychik S., Antonov A., Lesun A., Struk V. and Goldade V. Implementation of the Concept of Energy and Technological Compliance of Components in the Technology of Fluorocomposites // J. Mater. Sci. Eng. A. — 2022 (12), 1, 28—39

БЕСФТОРНЫЙ СИНТЕЗ MIL-101(Cr) ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

А.С. Тимоненкова¹, Т.Г. Шутова²¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,²ГНУ “Институт химии новых материалов НАН Беларуси”, Минск, Беларусь, tsutova@yahoo.com

Композиты на основе металлорганических координационных полимеров (МОКП) являются перспективными материалами для электроники, медицины, катализа и других областей, применение которых обусловлено высокой пористостью, большой удельной поверхностью порошков и связанной с ними хорошей адсорбционной способностью к молекулам различных классов [1]. Для MIL-101(Cr), химически представляющего собой терефталат хрома (III), удельная поверхность в зависимости от методики получения колеблется в интервале 2200—3500 м²/г [2]. Однако, в синтезе MIL-101(Cr) обычно используется HF — опасное и токсичное вещество, что существенно ограничивает применение этого МОКП.

Цель: получение MIL-101(Cr) бесфторным методом и исследование его кристаллографических и физико-химических характеристик.

Материалы и методы. Для синтеза MIL-101(Cr) суспензию из 1,4-бензолдикарбоновой кислоты (0,83 г) и Cr(NO₃)₃·9H₂O (2 г) в 20 мл H₂O нагревали в автоклаве (50 мл) при 210 °С 18 ч. Осадок промывали водой, этанолом, ацетоном и N,N-диметилформамидом и сушили 12 ч при 80 °С, а затем в вакууме 48 ч при 30 °С.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в излучении Co Kα. ИК-спектры получали на приборе Tensor 27 Bruker в KBr. Микроструктуру образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе LEO 1420. Поглощение воды измеряли с помощью анализатора влажности MAX 50 Radwag после 24 ч пребывания в атмосфере с влажностью 90 % при 20±1 °С. Адсорбционные свойства образцов оценивали из изотерм низкотемпературной (77 К) физической адсорбции-десорбции азота, полученных объемным методом на анализаторе площади поверхности и пористости ASAP 2020 MP (Micromeritics).

Результаты и их обсуждение. Интенсивность дифракционных рефлексов в рентгенографическом спектре порошка указывает на высокую кристалличность MIL-101(Cr) (рис. 1). Рефлексы при ~ 6,8, 9,7, 10,5, 12 и 19,1° были отнесены к дифракционным отражениям от плоскостей (311), (822), (753), (1022), (1395), это согласуется с тем, что ранее сообщалось для MIL-101(Cr) [1]. Интенсивные пики, появляющиеся при малых углах на рентгенограмме, указывают на то, что данный материал обладает очень большим количеством пор в структуре [2].

Согласно ИК-спектроскопии, химическая структура порошка соответствует MIL-101(Cr).

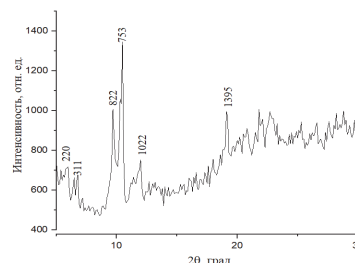
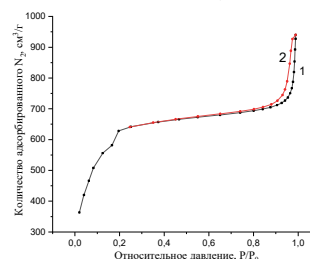


Рис. 1. Рентгенографический спектр MIL-101(Cr)

Микроструктурные исследования показали, что синтезированный порошкообразный материал представляет собой октаэдрические ограниченные кристаллы правильной формы со средним диаметром около 1 мкм.

На рис. 2 представлена изотерма адсорбции/десорбции N₂ обезвоженным MIL-101(Cr). Удельная поверхность MIL-101(Cr), рассчитанная методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) и по уравнению Ленгмюра, составляет около 2291 и 3179 м²/г, соответственно. Средний размер пор и общий объем пор MIL-101(Cr) оцениваются в 2,3 нм и 1,18 см³/г при относительном давлении P/P₀ = 0,97.

Рис. 2. Изотермы адсорбции (1) и десорбции (2) N₂ для MIL-101(Cr) при 77 К

Термогравиметрическим анализом установлено, что вода, адсорбированная в порах большего диаметра и составляющая 1,7 % веса MIL-101(Cr), испаряется в температурном интервале от 20 до 200 °С. При температурах от 200 до 320 °С удалялись молекулы воды из пор меньшего диаметра, что привело к снижению веса MIL-101(Cr) на 12%. При температуре выше 320 °С происходит разложение с потерей 46% массы MIL-101(Cr).

1. Férey G., Mellot-Draznieks C., Serre C., Millange F., Dutour J., Surble S., Margiolaki L. A chromium terephthalate-based solid with unusually large pore volumes and surface area // *Science* – 2005 (**309**), 2040–2042.
2. Kayal S., Sun B., Chakraborty A. Study of metal-organic framework MIL-101(Cr) for natural gas (methane) storage and compare with other MOFs // *Energy* – 2015 (**91**), 772–781.

СИНТЕЗ ТРИМЕЗИЛАТА МЕДИ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ АДсорбЦИИ ГАЗОВ

М.П. Флягина, А.С. Тимоненкова, В.В. Паньков

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, pankov@bsu.by

Металлоорганические координационные полимеры (МОКП) рассматриваются как перспективные материалы для хранения газообразного топлива (CH_4 , C_2H_2 , H_2), селективного улавливания ядовитых газов (CO , NO , NH_3 , SO_2) и сокращения выбросов CO_2 в атмосферу. Для некоторых МОКП показана возможность разделения азот-кислородных смесей с возможностью последующего хранения газа [1].

МОКП, известный как HKUST-1 или MOF-199, состоит из димеров ионов Cu^{2+} , где каждый ион меди координируется четырьмя кислородными линкерами, принадлежащими карбоксильным группам 1,3,5-бензолтрикарбоновой кислоты (БТК), и одной молекулой воды. Присутствие в структуре HKUST-1 редокс-активного переходного металла позволяет предположить возможность селективной адсорбции этим МОКП молекул O_2 посредством окислительно-восстановительной реакции.

Цель: синтез и исследование физико-химических свойств МОКП на основе меди и БТК (Cu-BTK).

Материалы и методы. Cu-BTK был синтезирован по методике [2] с использованием пентагидрата сульфата меди (II) в качестве источника ионов Cu^{2+} . Для получения Cu-BTK 1 г БТК и 1,56 г $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ растворяли в 100 мл диметилформамида (ДМФ), диспергировали ультразвуком 30 мин, а затем выдерживали 12 ч при 80 °C. Осадок отделяли центрифугированием и дважды промывали 50 % этанолом. Кристаллы сушили на воздухе при 50 °C в течение 8 ч.

Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в излучении $\text{Co K}\alpha$. ИК-спектры получали на приборе Tensor 27 Bruker в таблетках KBr. Микроструктуру образцов определяли на сканирующем электронном микроскопе LEO 1420. Поглощение воды порошком измеряли с помощью анализатора влажности MAX 50 Radwag, анализаторе влажности MAX 50, Radwag, Польша после 24 ч выдержки при заданной влажности (RH) и температуре (термогигрометр ТКА-ПКМ).

Результаты и их обсуждение. Согласно микроскопу порошок представляет собой кристаллы с размерами до 1 мкм (рис. 1). Интенсивные дифракционные рефлексы (рис. 2) указывают на высокую кристалличность Cu-BTK. Рефлексы при ~ 6,5, 9,3, 11,5 и 13,3° были отнесены к дифракционным отражениям от плоскостей (200), (220), (222) и (400) соответственно, что согласуется с кристаллической структурой HKUST-1 [1].

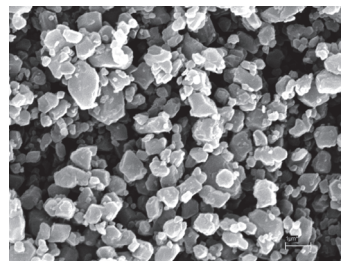


Рис. 1. СЭМ изображение Cu-BTK

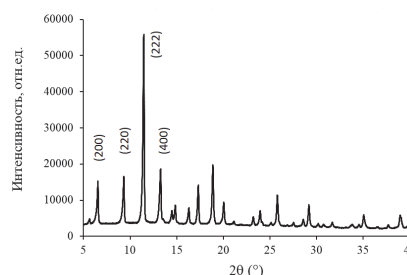


Рис. 2. Рентгенограмма порошка Cu-BTK

В ИК спектре Cu-BTK пики при 1374, 1446 и 1644 cm^{-1} отражают валентные колебания связей $\text{C}=\text{O}$ и $\text{C}-\text{O}$ карбоксильных анионов, образовавшихся при связывании COOH -групп БТК (1715 cm^{-1}) с ионами Cu^{2+} . Пик с максимумом при 489 cm^{-1} отнесен к колебаниям связей $\text{Cu}-\text{O}$. Группы пиков в областях 1600—1400 cm^{-1} и 900—650 cm^{-1} соответствуют валентным колебаниям связей $\text{C}=\text{C}$ и внеплоскостным деформационным колебаниям CH -связей ароматического кольца БТК. Интенсивная полоса поглощения при 1110 cm^{-1} указывает на включение некоторого количества сульфат-ионов в структуру Cu-BTK.

Поглощение водяного пара порошком Cu-BTK зависит от влажности (табл.1).

Таблица 1. Водопоглощение Cu-BTK

Водопоглощение, мг/мл	RH, %			
	4	10	85	90-97
Cu-BTK	51	89	379	885

Примечание. Температура 20 ± 1 °C.

- Adil K., Belmabkhout Y., Pillai R.S., Cadiau A., Bhatt P.M., Assen A.H., Maurin G., Eddaoudi M. Gas/vapour separation using ultra-microporous metal-organic frameworks: insights into the structure/separation relationship // Chem. Soc. Rev. — 2017 (46), 3402—3430.
- Mazani M., Aktij S.A., Rahimpour A., Kiadeh N.T.H. Cu-BTC Metal-Organic Framework Modified Membranes for Landfill Leachate Treatment // Water — 2020 (12) №1, 91.

ПОКРЫТИЯ ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА С АЛМАЗОПОДОБНЫМ УГЛЕРОДОМ, ПОЛУЧЕННЫЕ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ – СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

М.М. Хрущов¹, Д.А. Суляндзга¹, В.М. Авдюхина², И.С. Левин¹, В.Д. Самусенко¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; michel_x@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Цель работы. Использование металл-углеродных покрытий, получаемых ионно-плазменным напылением, может существенно повышать работоспособность трибосопряжений за счет присутствия в них аморфного (алмазоподобного, DLC) углерода [1-3]. Представлены данные о трибологическом поведении и структуре покрытий, полученных магнетронным распылением вольфрама и молибдена в среде ацетилена.

Материалы и методы исследования. Для нанесения покрытий использовали модельные образцы — ролики Ø 5×8 мм из стали ШХ15. Покрытие толщиной ~3 мкм наносили на их предварительно отполированные торцы. В качестве рабочего газа при напылении использовали аргон, в качестве углеродсодержащего газа-прекурсора — C₂H₂.

Комплексные исследования структурно-фазового состояния покрытий, их химического состава и нанотвердости вели с привлечением современных физических методов. Состояние углеродной фазы изучали методом спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР).

Исследование трибологических и антифрикционных характеристик покрытий проводили на модернизированной машине трения КТ-2 [4] (схема трения «вращающийся шарик – торцы трех роликов»). Контактным телом являлся шар из стали ШХ-15 Ø 12,5 мм. Условия испытаний (осевая нагрузка на узел трения – 108 Н, частота вращения шпинделя — 1 мин⁻¹) обеспечивали реализацию граничного режима смазки.

В качестве модельных смазочных сред использовали три композиции: инактивную (ПАО-4), поверхностно-активную (ПАО-4+1% олеиновой кислоты (ОК)) и химически активную серосодержащую (ПАО-4+2% ДФ-11 на базе диалкилдифосфата Zn).

Результаты и их обсуждение. СКР показала наличие в обоих типах покрытий неупорядоченной алмазоподобной структуры a-C:H. Локальные колебания интенсивности КР в отдельных образцах позволили предположить, что она распределена в них неравномерно. Покрытия Мо-DLC имели фазовый состав Mo+MoC+a-C:H и содержали ~75 ат.% металла и ~25 ат.% углерода. Покрытия W-DLC с фазовым составом W+W₂C+a-C:H содержали примерно поровну вольфрама и углерода. Нанотвердость Мо-DLC и W-DLC была ~13,5 и ~25 ГПа, соответственно. Выделения металлической и карбидной фаз имели размеры 4–15 и 3–5 нм, соответственно.

Как следует из результатов испытаний, нанесение углеродных покрытий, легированных молибденом и вольфрамом, существенно снижает коэффициент трения f даже при несмазанном контакте. Нанесение данных покрытий на сталь ШХ-15 приводит к тому, что f по срав-

нению с сухим трением образцов ШХ-15 в одноименном сочетании снижается вдвое, с 0,75 до 0,4, что сопоставимо с эффектом от использования вместо соответствующих покрытий смазки ПАО-4. Применение покрытий в сочетании с ПАО-4 приводит к дальнейшему снижению установившихся значений f до 0,14 в случае покрытий W-DLC и до 0,125 — в случае Мо-DLC. При этом коэффициент трения покрытий, испытанных с ПАО-4 и легированных Мо и W, ведет себя по-разному. В W-DLC f достаточно быстро растет с 0,12 до 0,155, затем держится более 30 мин на этом уровне и только после этого снижается до 0,14, тогда как в Мо-DLC f быстро нарастая, уже к 15 мин выходит на установившееся значение. В случае W-DLC при применении присадки ДФ-11 поведение f напоминает наблюдаемое в случае ПАО-4 без добавок, но максимальное f не превышает 0,12 при установившемся значении 0,11, достигаемом через 30 мин. В случае Мо-DLC с ДФ-11 f выходит на установившееся значение 0,105 плавно. При использовании олеиновой кислоты величина f быстро стабилизируется на уровне 0,105 и 0,90 в случае W-DLC и Мо-DLC, соответственно. Также в работе оценивались средние диаметры пятен износа, наблюдаемых при трибологических испытаниях соответствующих покрытий.

Полученные результаты позволили сделать вывод, что покрытия Мо-DLC, обеспечивают более низкое трение и износ, чем легированные W. Наиболее эффективны оказались они в сочетании с поверхностно-активными смазочными средами. Это значит, что трибохимическое взаимодействие легирующих элементов со смазочной средой, которым принято объяснять повышение антифрикционных свойств масел в присутствии химически активных добавок [5], может ограничиваться рядом факторов, связанных с технологически обусловленным структурным состоянием металл-углеродных покрытий, в частности, недостаточным содержанием алмазоподобной углеродной фазы.

1. Tribology of Diamond-like Carbon Films: Fundamentals and Applications / Ed. by C. Donnet, A. Erdemir. – N.Y.: Springer. – 2008
2. Semenov A.P. Ion-plasma methods of application of diamond and diamond-like coatings // J. Frict. Wear. – 2009 (30), 62–75
3. Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин / Под ред. Г.В. Москвитина. – М.: Ленанд. – 2013
4. Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И. Модернизация узла трения машины КТ-2 для оценки антифрикционных характеристик окских покрытий при трении в режиме граничной смазки // Зав. лаб.: Диагн. матер. – 2019 (85), № 12, 65–68
5. Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самусенко В.Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке: ч. 2. Смазка химически модифицированным слоем // Материаловедение – 2021, № 10, 3–11

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПРОИЗВОДНЫХ ХИТОЗАНА И ГЛЮКОЗЫ

Е.О. Чекановская¹, А.Н. Красковский¹, Е.И. Ладутько², К.С. Гилевская¹

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; aleks.kraskovsky@gmail.com

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Хитозан (Хит) - один из широко используемых в медицине и пищевой промышленности природных полисахаридов, который обладает такими физиологическими свойствами как высокая ранозаживляющая и сорбционная способности, противоопухолевая, противовирусная, антиоксидантная активности и др. [1]. В последние годы активно ведется поиск подходов к модификации Хит для улучшения его растворимости, антиоксидантных и противомикробных свойств. Например, новые производные Хит могут быть получены по реакции Майяра [2]. Продукты реакции Майяра на основе Хит и моно- или дисахаридов проявляют улучшенные антиоксидантные или антимикробные свойства и являются перспективными консервантами для рыбы, морепродуктов, фруктов, овощей [2].

Цель данной работы — получение производных хитозана (30 кДа, СД 98%) и глюкозы по реакции Майяра, изучение их физико-химических свойств и оценка антиоксидантного и антимикробного потенциалов.

Материалы и методы. Для синтеза производных раствор Хит (2,0%) в 2% уксусной кислоте смешивали с раствором глюкозы различной концентрации. Конечная концентрация Хит в смеси составляла 1%, глюкозы — 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0%. Реакционную смесь автоклавировали (1,5 атм, 121°C) в течении 60 мин. Затем смесь очищали диализом 12 ч против дистиллированной воды (целлюлозные диализные трубки, 14 кДа, Sigma, США).

Результаты и их обсуждение. Показано, что адсорбция при 282—289 нм (образование интермедиатов, промежуточных продуктов реакции Майяра) и 420 нм (образование меланоидинов, конечных продуктов реакции) возрастает с увеличением концентрации глюкозы (рис. 1).

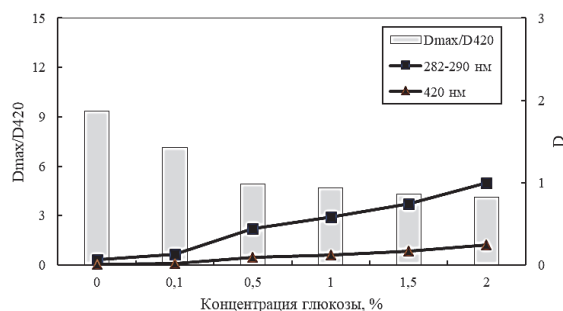


Рис. 1. Поглощение реакционных смесей Хит с глюкозой при длине волны 282—289 и 420 нм

Соотношение поглощения при 282—289 нм и 420 нм отражает полноту протекания реакции: чем

меньше значение $D_{\max}/D_{420}$, тем выше полнота протекания реакции. При увеличении концентрации глюкозы в 5 раз от 0,1 до 0,5% степень конверсии хитозана увеличивается на ~ 40% и в дальнейшем изменяется незначительно (рис. 1).

Установлено, что с увеличением концентрации глюкозы интенсивность флуоресценции смеси уменьшается в 5 раз, что свидетельствует о превращении промежуточных флуоресцентных соединений в конечные продукты реакции.

Значения антирадикальной активности производных Хит и глюкозы, оцененные по методу, основанному на восстановлении ABTS⁺, возрастают в 1,7—10,0 раз по сравнению с хитозаном и составляют до $58,64 \pm 4,06$ мкг-экв. аскорбиновой кислоты/мг образца (рис. 2).

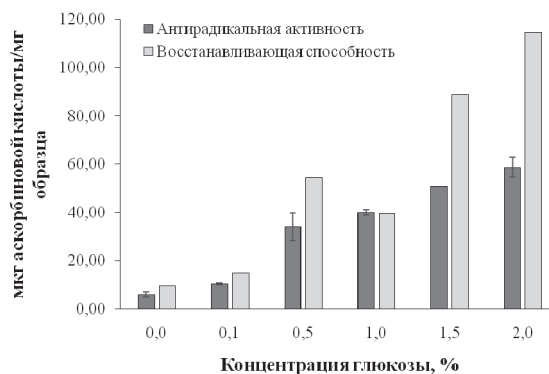


Рис. 2. Антирадикальная активность и восстанавливающая способность производных Хит и глюкозы

Установлено, что восстанавливающая способность производных Хит и глюкозы, определенная с использованием реактива Фолина-Чокальтеу, в 1,5—12,0 раз выше по сравнению с Хит (рис. 2).

Показана антимикробная активность полученных производных Хит и глюкозы в отношении штаммов микроорганизмов, вызывающих порчу продуктов питания.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект X22КИ-011).

- Варламов В. П., Ильина А. В., Шагдарова Б. Ц., Луньков А. П., Мысякина И. С. Хитин/хитозан и его производные: фундаментальные и прикладные аспекты // *Успехи биологической химии*. – 2020 (**60**), 317–368
- Hafsa J., Smach M. A., Mrid R. B., Sobeh M., Majdoub H., Yasri A. Functional properties of chitosan derivatives obtained through Maillard reaction: A novel promising food preservative // *Food Chem.* – 2021 (**349**), 129072

УЛЬТРАТОНКИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИСАХАРИД-АГ

Е.О. Чекановская¹, В.В. Николайчук¹, А.Н. Красковский¹,
К.С. Гилевская¹, С.В. Пинчук², Е.А. Степанова³, В.И. Куликовская¹

¹Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; k_hilevskaya@mail.ru

²Государственное научное учреждение «Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

³Республиканское научно-исследовательское дочернее унитарное предприятие "Институт экспериментальной ветеринарии им. С.Н. Вышелесского", Минск, Беларусь

Разработка ультратонких биоразлагаемых покрытий, пригодных для модификации изделий сложной геометрии с целью изменения таких свойств их поверхности как смачиваемость, шероховатость, биосовместимость, а также для придания дополнительных антимикробных свойств — актуальная задача современного материаловедения. Использование природных полимеров для этих целей, например, полисахаридов, позволяет создавать покрытия с уникальными свойствами (биосовместимостью и биорезорбируемостью), что немаловажно для использования в биомедицинских приложениях, например, для модификации имплантатов. Для создания материалов с выраженными антимикробными свойствами перспективным также является использование полимеров в сочетании с неорганическими наночастицами металлов, например, серебра [1].

Цель данной работы — формирование и изучение физико-химических характеристик ультратонких пленок на основе полисахаридов и их наноконкомпозитов с наночастицами серебра.

Материалы и методы. Гидрозоли пектин-Аг и хитозан-Аг синтезировали по методикам, опубликованным в работах [1, 2], с небольшими изменениями. Значения ξ -потенциала синтезированных наночастиц определяли по электрофоретической подвижности методом динамического светорассеивания (Zetasizer Nano ZS). Ультратонкие пленки (хитозан-Аг/пектин-Аг)₁₀ и (хитозан-Аг/пектин)₁₀ формировали методом послойного осаждения. Закономерности адсорбции изучали методом кварцевого микровзвешивания (QSense Analyzer).

Результаты и обсуждение. Установлено, что синтезированные наночастицы пектин-Аг так же, как и исходные макромолекулы пектина, отрицательно заряжены ($|30\div50|$ мВ) при pH от 2 до 13. В то время как наночастицы хитозан-Аг положительно заряжены лишь при pH менее 8-9 и имеют изоэлектрическую точку в области щелочных значений pH. Установлены оптимальные значения pH (от 2,0 до 6,5), при которых поликатионный и полианионный компоненты для формирования ультратонких пленок сохраняют седиментационную и агрегативную стабильность и имеют максимальный заряд ($\geq|30|$ мВ).

Для определения терапевтического окна установлены значения IC50 в отношении мезенхимальных стволовых клеток для наночастиц хитозан-Аг (5—30 мкг/мл). На основании данных скрининга цитотоксического действия и антибактериальной активности для получения ультратонких пленок выбраны наночастицы с максимальным ингибирующим действием в отношении патогенных микроорганизмов. Масса пленок (хитозан-Аг/пектин)₁₀ возрастает экспоненциально ($R^2 = 0.961$) с увеличением числа бислоев от 1 до 10 (рис. 1). В то время как для покрытий (хитозан-Аг/пектин-Аг)₁₀ эта зависимость имеет линейный характер ($R^2 = 0.996$) (рис. 1). Установлено, что сформированные пленки являются вязкоэластичными. Рассчитанное значение толщины пленок составляет 60.5 ± 1.4 и 282.4 ± 6.8 нм для (хитозан-Аг/пектин-Аг)₁₀ и (хитозан-Аг/пектин)₁₀ соответственно.

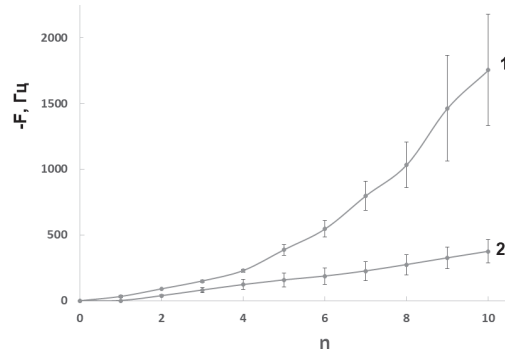


Рис. 1. Изменение частоты колебаний кварцевого резонатора при формировании на его поверхности пленок (хитозан-Аг/пектин)₁₀ (1) и (хитозан-Аг/пектин-Аг)₁₀ (2)

Благодарность. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (грант № Б21В-002).

1. Kulikouskaya V., Hileuskaya K., Kraskouski A. et al / Chitosan-capped silver nanoparticles: A comprehensive study of polymer molecular weight effect on the reaction kinetic, physicochemical properties and synergetic antibacterial potential // SPE Polymers. – 2022 (3), № 2 – P. 77-90.
2. Hileuskaya K., Ladutska A., Kraskouski A. et al / 'Green' approach for obtaining stable pectin-capped silver nanoparticles: physico-chemical characterization and antibacterial activity // Colloids Surf. A. – 2020 (585), 124141.

ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКЗОСОМ КРОВИ КРЫС

И.А. Челнокова¹, М.Н. Стародубцева^{1,2}, И.А. Никитина², Н.И. Егоренков²

¹Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси»,
Гомель, Беларусь; irenachelnokova@gmail.com

²Учреждение образования «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь;
marysta@mail.ru

В связи с увеличением числа разного рода медицинских процедур, в которых используется рентгеновское излучение, в последние годы на человека увеличивается дозовая нагрузка. Предполагается, что экзосомы, внеклеточные везикулы размером 30—150 нм, циркулирующие во всех биологических жидкостях, могут быть участниками механизма развития радиационных эффектов, отдалённых как по времени, так и пространственно от места локализации первичного радиационного воздействия. Однако из-за их наноразмера изучение экзосом ограничено небольшим кругом современных методов исследования. Одним из этих методов является атомно-силовая микроскопия (АСМ). К преимуществам метода можно отнести возможность получения трёхмерных изображений исследуемого объекта при сканировании в жидкости, что позволяет изучать биологические объекты в условиях, максимально приближенным к естественным, а также измерение параметров их механических свойств.

Целью работы являлся сравнительный анализ модуля упругости и силы адгезии поверхности экзосом крыс линии Вистар при облучении цельной крови *in vitro* рентгеновским излучением в дозах 1 и 100 Гр.

Материалы и методы. Экзосомы выделяли методом ультрацентрифугирования [1] из плазмы крови крыс линии Wistar после 3-х месячной гиперхолестериновой диеты. Цельную кровь облучали рентгеновским излучением в дозах 1 и 100 Гр с помощью рентгеновского аппарата биологического назначения X-RAD 320 Precision X-Ray Inc с последующей иммобилизацией частиц на пластинках свежесколотой слюды, модифицированной 0,1% поли-L-лизинном. Сканирование проводили в фосфатно-солевом буфере с помощью атомно-силового микроскопа BioScopeResolve (Bruker, США) в режиме записи PeakForce QNM in Fluid иглой-зондом SCANASYST-FLUID+ с радиусом закругления 2 нм, с жёсткостью 0,4 Н/м. Полученные АСМ-изображения анализировались с помощью программы NanoScopeAnalysis 1.9. Оценивали модуль упругости (E) с использованием модели Дерягина-Мюллера-Топорова и силу адгезии (F_a).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что облучение цельной крови рентгеновским излучением в дозе 1 Гр ведёт к резкому увеличению жёсткости поверхности экзосом крови. При этом, увеличение дозы рентгеновского излучения до 100 Гр не ведёт к дальнейшему изменению упругих свойств поверхности экзосом (табл. 1).

Таблица 1. Параметры упругих и адгезионных свойств экзосом плазмы крови крысы в контроле и после облучения рентгеновским излучением

Параметр	0 Гр	1 Гр	100 Гр
E, МПа	16,66 (13,58; 21,29)	23,87* (18,51; 30,34)	26,49* (20,65; 31,10)
F _a , нН	114,39 (101,81; 342,11)	35,89** (19,94; 53,16)	85,37** (73,08; 97,67)

Примечание — Над чертой медиана, под чертой — (нижний квартиль — верхний квартиль);

* — Различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром контрольного образца, критерий Краскела-Уоллиса с поправкой Бонферрони ($p < 0,05$);

** — Различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром контроля и с другой дозой облучения, критерий Краскела-Уоллиса с поправкой Бонферрони ($p < 0,05$).

Характер изменения сил адгезии с дозой облучения другой: при дозе 1 Гр имеет место уменьшение значений сил адгезии в 3,2 раза в сравнении с контрольными значениями, а при дозе 100 Гр имеет место увеличение силы адгезии в 1,3 раза в сравнении с контрольными значениями (табл. 1).

Заключение. С помощью АСМ выявлены изменения упругих и адгезионных свойств поверхности экзосом плазмы крови крыс после воздействия на цельную кровь рентгеновским излучением в дозах 1 и 100 Гр.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Б20Р-427 2020-2022 гг.).

1. Челнокова, И.А. Изучение геометрических и механических свойств наночастиц разной природы с помощью атомно-силового микроскопии в режиме PeakForce QNM / И.А. Челнокова, Б.В. Ронищенко, М.Н. Стародубцева // Проблемы здоровья и экологии. — 2020. — № 2 (64). — С. 143—148.

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОК ПОЛИСТИРОЛА И ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Э.М. Шпилевский, С.А. Филатов

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь, eshpilevsky@rambler.ru

Полимеры различного типа и фуллерены, могут образовывать комплексы с переносом заряда, при этом молекулы C_{60} могут выступать как в качестве основы полимерной цепи при полимеризации собственно молекул C_{60} , так и в качестве соединительного элемента между полимерными цепями иной природы [1]. Во втором случае молекулы C_{60} могут иметь связь с несколькими полимерными цепочками, выступая в роли ядра и образуя вместе с ними макромолекулу. При этом C_{60} могут существенно изменять свойства полимеров (прочность, термостабильность, электропроводность) [2]. Целью исследования являлось изучение механических и оптических свойств пленочных композитов на основе полимеров и фуллерена C_{60} .

В полимерную матрицу фуллерены вводились (аналогично [3]) двумя способами: смешиванием растворов в толуоле полистирола (ПС) и фуллеренов, а также пропиткой плёнок полиэтилена высокого давления (ПЭВД) раствором фуллерена C_{60} в толуоле. Для достижения однородности выбранных составов смеси выдерживались в ультразвуковой ванне УЗВ-2/150-ТН (рабочая частота 27 кГц, мощность генератора 50 Вт) в течение 80 минут.

Последующая сушка проводилась на воздухе при комнатной температуре в течение 48 часов. Исследовались образцы с различной (от 0,05 до 2,50%) массовой долей фуллеренов C_{60} .

Механические свойства плёнок модифицированных полимеров, определяли на разрывной машине «Инстрон» при скорости движения подвижных захватов 60 мм/мин. Оптические спектры пропускания получали с помощью спектрометра CARY-500 в диапазоне 200–900 нм.

В результате допирования фуллеренами полимеров (ПС и ПЭВД) увеличивается модуль Юнга, повышается твердость, замедляется процесс старения, увеличивается гидрофобность. Упрочнение полимеров введением фуллеренов вызвана структурными изменениями, приводящими к упорядочению макромолекул при допировании фуллеренами, что подтверждают оптические измерения. Во всех экспериментах наблюдалось немонотонное изменение предела прочности при разрыве в зависимости от содержания наполнителя. Для пленок ПС максимальные значения предела прочности и модуля Юнга достигались при содержании 0,25 мас.% фуллеренов C_{60} , для пленок ПЭВД — при 0,05 мас.% фуллеренов C_{60} .

Пленки чистого ПС поглощают УФ вплоть до

272 нм, в области до 285 нм пропускание возрастает до 50%, а затем коэффициент пропускания линейно возрастает в зависимости от волнового числа, достигая 90% при 900 нм. В спектрах пленок композитов ПС- C_{60} наблюдается широкая интенсивная полоса пропускания в диапазоне 270–335 нм с максимумом вблизи 314 нм, которая при увеличении концентрации молекул фуллерена от 0,05 до 5,0 мас.% уменьшается по интенсивности в 10 раз. При содержании 0,50 мас.% и более молекул C_{60} в полимерной матрице регистрируется нулевое пропускание в области 335–355 нм. Для пленок ПС- C_{60} с невысокой массовой долей (0,050–0,20 мас.%) фуллеренов обнаружено слабое пропускание в области 230–250 нм, в которой чистый полистирол имеет 100% поглощение.

Полимерная матрица ПЭВД оказывает более сильное влияние на деформационные колебания (575 и 526 см⁻¹) молекулы фуллерена C_{60} . При сравнении спектров пропускания материалов ПЭВД- C_{60} и чистого ПЭВД наблюдаются заметные различия. Положение линий ПЭВД в спектрах образцов ПЭВД- C_{60} остается неизменным, однако для некоторых из них наблюдается изменение полуширины. Изменение контура линии ПЭВД в спектрах образцов ПЭВД- C_{60} фиксировалось в области валентной колебательной моды молекул C_{60} 1426 см⁻¹, чувствительной к влиянию заряда.

Установлены зависимости свойств композитов ПС- C_{60} и ПЭВД- C_{60} от долевого содержания фуллереновых молекул и технологических условий приготовления (концентрации раствора, длительности пропитки, температуры сушки). Изменение механических свойств фуллереносодержащих ПС и ПЭВД при разной концентрации проявляется в изменении оптических свойств фуллереносодержащих ПС и ПЭВД при разной концентрации (проявившееся в сдвиге и изменении полуширины колебательных линий C_{60}), что обусловлено как вкладом компонентов композиционного материала, так и надмолекулярным структурообразованием матрицы.

1. Карпачева Г.П. Фуллереносодержащие полимеры. Высокомолек. соед. С. 2000. Т. 42. № 11. С. 1974–1999.
2. Tuvshintur, P., Optical property of contained fullerene polymers / P.Tuvshintur, E. M. Shpilevsky, S. A. Filatov [et.al.]. // *Solid State Phenomena*. 2021.- Vol. 323, №8.- P. 42–47.
3. Шпилевский, Э.М. Получение и свойства фуллеренов, фуллеритов, металл-фуллереновых композитов / Э.М.Шпилевский. – Минск, 2017. – 43 с. – (Препринт ИТМО имени А.В. Лыкова НАН Беларуси №2).

ФРОНТАЛЬНАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ АКРИЛАМИДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ В ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНОВЫХ ТРУБЧАТЫХ РЕАКТОРАХМ.Б. Шуляковская¹, В.Д. Левкович¹, Е.В. Гринюк²¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; marieshulyakouskaja@gmail.com²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь

Введение. Полимеры и полиэлектролитные гидрогели на основе акриламида (АА) широко используются в очистке сточных вод, в качестве носителей лекарственных средств, в нефтедобывающей промышленности и т.д. [1, 2]. Один из методов получения полимерных материалов на основе АА — фронтальная полимеризация (ФП), являющаяся автоволновым процессом превращения мономера в полимер в локализованной реакционной зоне, называемой фронтом реакции [3]. ФП является технологичным и удобным способом синтеза полимеров, а ее обязательным условием является экзотермичность реакции, позволяющая сформировать фронт.

При ФП АА в водных растворах межмолекулярная имидизация из-за высоких температур фронта приводит к образованию в качестве продуктов реакции гидрогелей, которые обладают высокой адгезией к стенкам реактора, что затрудняет перемещение продукта и реакционной среды при реализации процесса в непрерывном режиме. С целью устранения указанных недостатков в настоящей работе предложено использовать трубчатые реакторы из полидиметилсилоксана, обладающего хорошей термической стойкостью, химической инертностью и эластичностью [4].

Цель. Установить принципиальную возможность осуществления процесса ФП АА в водных растворах с использованием полидиметилсилоксановых трубчатых реакторов в непрерывном и периодическом режимах, а также изучить макрокинетические параметры процесса.

Методы исследования. В качестве инициатора полимеризации использовали персульфат аммония (ПСА). Мольное соотношение «мономер — растворитель» составило 1:1. Концентрация инициатора варьировалась от 0,25 до 2,5 мол. %.

Скорость фронта определяли, измеряя расстояние, пройденное фронтом за определенный временной интервал. Температуру фронта измеряли с помощью термодпары К-типа, погруженной в раствор мономера.

Результаты. В ходе выполнения экспериментальных работ установлено, что процесс ФП АА в водных растворах протекает в непрерывном режиме при концентрациях инициатора не ниже 0,5 мол. % (табл. 1). При более низких концентрациях инициатора наблюдается остановка процесса полимеризации из-за затухания фронта.

Таблица 1. Макрокинетические параметры (скорость) ФП АА в непрерывном режиме в водных растворах

Концентрация ПСА, мол. %	Скорость распространения фронта, см/мин
0,25	Реакция не прошла
0,50	3,81
1,00	4,10
1,50	5,29

Макрокинетические параметры фронта при проведении процесса в периодическом режиме приведены в таблице 2. Максимальная температура фронта достигала 130 °С, максимальная скорость распространения фронта — 2,4 см/мин.

Таблица 2. Макрокинетические параметры ФП АА в периодическом режиме в водных растворах

Концентрация ПСА, мол. %	Скорость распространения фронта, см/мин	Температура фронта, °С
0,50	1,0	119
0,75	1,6	130
1,00	1,6	118
1,25	1,8	118
1,50	1,9	124
1,75	2,2	125
2,00	2,1	114
2,50	2,4	125

Заключение. Установлена принципиальная возможность проведения ФП АА в непрерывном и периодическом режимах в полидиметилсилоксановых трубчатых реакторах. При этом показано, что минимальная концентрация инициатора, достаточная для проведения процесса, составляет 0,25 мол. %. Дальнейшее увеличение концентрации инициатора приводит к повышению скорости фронта.

- Gavini E., Mariani A., Rassu G., Bidali S., Spada G., Bonferoni M. C., Giunchedi P. Frontal polymerization as a new method for developing drug controlled release systems (DCRS) based on polyacrylamide // *European Polymer Journal*, 2009, vol. 45, is. 3, pp. 690–699.
- Куценков В. Ф. Водорастворимые полимеры акриламида // *Соросовский образовательный журнал*. 1997. № 5. С. 48–53.
- Pojman J. A., Ilyashenko V. M., Khan A. M. Free-radical frontal polymerization: selfpropagating thermal reaction waves // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 1996, vol. 92, is. 16, pp. 2825–2837.
- Grassie, N., & Macfarlane, I. G. (1978). The thermal degradation of polysiloxanes—I. Poly(dimethylsiloxane). *European Polymer Journal*, 14(11), 875–884.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Abdullaev Kh.M.	113	Агабеков В.Е.	26, 151
Changhong L.	8	Адериха В.Н.	13, 51
Chelnokova I.A.	67	Акулова В.М.	27
Dzhonmurodov A.S.	115	Алексиев А.	37
Fedorenko A.A.	42, 66	Анисович А.Г.	119, 139
Fomina E.K.	66	Антонов А.С.	118, 120, 164
Grigoryan K.M.	114	Антонова А.Л.	121
Hileuskaya K.S.	114	Аргунова А.Г.	157
Hryniuk Y.V.	42, 66, 116	Астапкин А.С.	69
Huang M.	8	Асчян Г.О.	146
Ismoilov I.B.	113	Бабич В.Е.	41
Karachrysafi S.	67	Бардушкин В.В.	135
Karampatakis V.	67	Басинюк В.Л.	58, 70
Klimovtsova I.A.	66	Безносик Т.А.	122
Komnenou A.	67	Бекташи С.А.	132
Kostjuk S.V.	42	Бердиев А.Г.	123
Kudryavsky D.L.	66	Березина Е.В.	154
Kulikouskaya V.I.	114	Бильдюкевич А.В.	17, 18, 108, 124, 163
Ladutska A.I.	114	Бисерова Н.В.	71
Levchenko V.	8	Бобкова Е.Ю.	125
Muhidinov Z.K.	113, 115	Бобрышева С.Н.	93
Nikalaichuk V.V.	114	Богданова В.В.	126
Papamitsou Th.	67	Богданович С.П.	92, 106
Parfenov A.S.	117	Борисова М.Э.	14, 35
Ping Z.	8	Борисова Р.В.	152
Sal'nikova I.A.	42	Борозна В.Д.	40
Savilov S.V.	117	Брундуков А.С.	98, 99
Sherova Z.U.	115	Бувечич Т.В.	56, 57
Shilov M.A.	117	Буркин А.Н.	16, 39, 40
Shkliarava N.M.	67	Бурть Е.С.	17, 18, 163
Shuliakouskaya M.B.	116	Бухаров С.Н.	37, 62, 97
Sidarenka A.V.	114	Буяновский И.А.	49
Sioga A.	67	Василевская Л.Н.	125, 128
Smirnova A.I.	117	Васильев А.П.	127
Starodubtseva M.N.	67	Васильева А.С.	71, 91
Stolbov D.N.	117	Васильева В.С.	128, 129
Usmanova S.R.	115	Винидиктова Н.С.	44, 69, 72, 76, 81, 86
Usol'tseva N.V.	117	Волков А.В.	154
Wu J.	8	Волкотруб Р.Е.	70
Yang T.	8	Волнянко Е.Н.	73, 74, 79
Ying P.	8	Волочко А.Т.	53
Zakharevich N.V.	116	Воробьева Е.В.	73
Авдеева Е.В.	26, 68	Ворса В.Ж.	145
Авдейчик С.В.	118	Врублевский А.В.	19
Авдюхина В.М.	167	Выдумчик С.В.	129

Гавриленко О.О.	125	Ильющенко А.Ф.	47
Гайшун В.Е.	134	Кадолич Ж.В.	103
Гапанькова Е.И.	15, 75	Калинин Л.А.	29, 82
Гарбарук В.Ю.	36	Камалов А.М.	14, 35
Герасименко С.А.	102	Карапетян А.Н.	133
Гилевская К.С.	168, 169	Кимленко И.М.	122, 134
Глазунова А.А.	70	Киргинцева С.В.	149
Глевицкая Т.А.	124	Климовцова И.А.	33, 83
Глинников Е.С.	76	Клочко П.В.	120
Гоголева О.В.	130	Кобец О.И.	126
Годлевский В.А.	154	Ковалёва И.Н.	60, 77, 80
Гольдаде В.А.	36, 40, 81	Ковалёва Я.А.	30
Гракович П.Н.	30, 43	Коваль В.В.	141
Григорьев А.Я.	5, 6, 31, 105	Коваль В.Н.	13
Григорьев Ф.А.	60, 77, 78	Ковалько М.С.	53
Гриншпан Д.Д.	25, 122	Коврига В.В.	10, 28, 71, 91
Гринюк Е.В.	33, 83, 172	Коднянко Е.В.	63
Грошев И.М.	39	Кожевникова Г.В.	84, 85
Гуцев Д.М.	54, 60	Кожушко В.В.	31, 37, 62, 97
Давыдов А.А.	106	Козлов Д.А.	142
Данилова С.Н.	127	Колбая В.Г.	28
Джавадов М.Я.	131	Колбе К.А.	14
Джанахмедов А.Х.	131	Колесников В.И.	135
Джафаров В.Д.	104, 132	Комаров А.И.	136, 137
Диденко А.Л.	14	Конакова О.В.	86
Дмитриев Н.Н.	55	Кондаков М.Н.	130
Доан Х.Т.	150	Константинов Е.О.	95
Добровольская И.П.	14	Концевая И.И.	143
Дойлин Ю.В.	16	Кончиц В.В.	5
Докукин В.Д.	74	Копченков В.Г.	138
Долинская Р.М.	79	Короткин Г.П.	139
Дорошко Е.Ю.	44	Косенок Я.А.	134
Дробыш Т.В.	20, 110	Костюкевич П.А.	87, 88
Дубенец С.С.	52, 85	Красковский А.Н.	168, 169
Дувалов П.Ю.	139	Криваль Д.В.	140, 141
Дудчик Н.В.	26	Крутько Э.Т.	164
Дьяконов А.А.	127	Ксенофонтов М.А.	128, 129
Егоренков Н.И.	170	Кудина Е.Ф.	45, 89
Жандаров С.Ф.	43, 98	Кудрицкий В.Г.	54, 153
Жарин А.Л.	148	Кудрявский Д.Л.	33, 83
Жорник В.И.	9	Кузей А.М.	87
Журавлева В.Л.	119	Кузнецов А.А.	163
Завадский С.М.	150	Кузнецов А.В.	28
Запольский А.В.	9	Кузнецова Т.Ф.	30
Злотников И.И.	80	Кузьменков Д.С.	149
Зотов С.В.	16, 40, 44, 81, 86, 104, 121	Куксенова Л.И.	142
Иванец А.И.	17	Куликовская В.И.	169
Иванов Л.Ф.	29, 82	Курилёнок А.А.	136
Иванькова Е.М.	14	Курицын П.А.	89
Ивахник А.В.	9	Куява И.	18
Игнатенко П.Ю.	78	Куявский В.	18
Игнатович Ж.В.	151	Лавров И.В.	135

Ладутько Е.И.....	168	Николайчук В.В.	169
Лазарева Н.Н.....	152	Новик Х.А.....	151
Латышев И.А.	15, 75	Новицкая М.Б.....	134
Ле Тхи Ми Хань.....	122	Овчинников К.В.....	93, 94
Лебедев В.Я.....	41, 87	Оганесян К.В.	133
Леванцевич М.А.	58, 90, 107	Олейник А.Д.....	26
Левин И.С.....	167	Орда Д.В.	136
Левкович В.Д.	172	Орлова А.М.	163
Левченко В.А.	49	Охлопкова А.А.....	127, 152
Леонов А.Ю.	144	Охлопкова Т.А.....	152
Лесун А.Н.....	118, 164	Павлов А.А.	35
Лешок А.В.....	47	Павлюкевич Т.Г.	129
Ли Г.....	18	Панин С.В.....	7
Лобанов К.А.....	91	Панкевич Д.К.....	153
Лось Д.М.	81	Пантелеев К.В.	148
Луцко В.Ф.	25	Паньков В.В.....	161, 166
Лю Имин.....	143	Парфенов А.С.....	154
Любимова Е.С.....	124	Пасовец В.Н.....	94
Люкшин Б.А.....	7	Перевозникова А.Б.....	126
Макаревич С.Е.....	25	Петкевич А.В.....	26
Макаренко В.М.....	98, 101	Петрова П.Н.....	130
Макаренко О.А.	73	Петровская А.С.	147, 155
Макарова Ж.Е.	88	Петроковец Е.М.	20, 55
Максимович Е.С.	56, 57	Петрусевиц В.В.	156
Максимченко Н.Н.....	90	Петухова Е.С.	157
Малафеев К.В.	35	Пилипцов Д.Г.	158, 162
Маленко П.И.....	144	Пилипчук Е.В.	90
Манафов М.А.....	132	Пинчук С.В.....	169
Маркевич М.И.	119	Платов С.И.....	58
Марусенко Н.А.	92	Плиско Т.В.....	17, 18, 108, 124, 163
Марченко Л.Н.	77	Подгорная В.В.....	77
Медяк Г.В.....	145	Поддубко С.Н.....	70
Мелеховец Н.А.	134	Подобед Д.Л.	80, 93, 94, 104
Меликсетян Н.Г.....	146	Поликарпов А.А.....	145
Мельников С.Ф.....	93	Понарядов В.В.....	128, 129
Мельникова Г.Б.	27, 147, 155, 160	Попенкова И.Н.	33
Меринов В.К.	61, 62, 97	Попкова Ю.И.....	32
Микитевич В.А.	148	Попов А.Н.....	162
Михалко А.М.....	26	Попова Е.Н.	14
Можаровский В.В.....	149	Приходько И.В.	89
Москалева М.В.	149	Прожега М.В.	48, 59, 95
Мохаммад Р.Р.	134	Прозорович В.Г.....	17
Мусаева Г.Г.....	132	Прокопчук Н.Р.	79, 120
Мышкин Н.К.....	5, 6, 60	Прудников М.И.	50
Мякишев В.С.....	138	Раджабова М.Д.....	132
Назаров Е.А.....	124	Радюк А.Н.....	16
Назарович А.Н.....	19, 38	Радюкевич Д.Л.	155
Нахвват Д.В.	120	Рева О.В.	19, 38, 140, 141
Неверов А.С.....	68	Релмасира К.Д.....	144
Нестерчик Р.И.....	150	Рещиков Е.О.....	48, 59, 95
Никитина И.А.	34, 170	Рогачев А.А.	26, 143
Николаев В.И.....	78	Рогачев А.В.....	143, 158

Романюк А.С.	137	Филатов С.А.	171
Рубаник В.В.	25	Филиппович Л.Н.	151
Руденков А.С.	158, 159	Флягина М.П.	166
Рябцев А.С.	69	Фомина Е.К.	33, 83
Савицкая Т.А.	25, 122	Францкевич А.В.	87, 88
Сазанков А.П.	20, 110	Фролов С.А.	143
Сакевич В.Н.	56, 57	Халилова С.М.	132
Самусенко В.Д.	49, 167	Харак Я.В.	38
Сапсалёв Д.В.	147, 160	Хрущов М.М.	49, 167
Сароян В.В.	133	Цай Ф.	106
Сахаревич Д.Ю.	161	Царенко И.В.	69
Саховский К.А.	162	Цветкова Е.А.	44, 81, 103
Се Ю.	92	Чарнаштан Д.В.	78
Селькин В.П.	96	Чеботарев Е.А.	138
Сергиенко В.П.	31, 37, 62, 97	Чекановская Е.О.	168, 169
Середа А.А.	159	Челнокова И.А.	34, 170
Сильвистрович В.И.	103	Чепкасов С.Ю.	158
Скороход А.З.	82	Черников Д.А.	28
Славников Р.Ю.	81	Черноус Д.А.	21, 63
Солдатова А.Е.	163	Чирик С.А.	147, 155, 160
Соломянский А.Е.	27	Чишанков И.Г.	27
Сосновский И.А.	136	Шаповалов А.В.	93, 99
Стародубцева М.Н.	34, 170	Шаповалов В.А.	13, 51
Стасенко Д.Л.	76	Шаповалов В.М.	16, 80, 81, 86, 104, 105, 121
Степанова Е.А.	169	Шахаб С.Н.	151
Стерехов О.С.	96	Шевченко В.В.	106
Стратанович В.А.	98, 99	Шелег В.К.	107
Струк В.А.	118, 120, 164	Шелестова В.А.	101
Суляндзга Д.А.	167	Шиканов С.С.	108
Сычко В.Е.	40, 121	Шилько И.С.	99, 109
Сычев А.А.	135	Шилько С.В.	7, 20, 21, 110
Сычев А.П.	135	Шкредова Н.А.	125, 128
Тарасова П.Н.	152	Шодиев М.М.	107
Тарутько К.И.	39	Шпилевский Э.М.	171
Тимоненкова А.С.	165, 166	Шуляковская М.Б.	172
Тимофеенко А.А.	16, 100, 104	Шумская В.Ю.	29, 43
Тимошенко А.В.	74	Шумская Е.Е.	26
Толстая Т.Н.	147	Шункевич А.А.	145
Толстомятов Е.М.	29, 101	Шутова Т.Г.	161, 165
Трубицкий Р.Э.	53	Щукин В.Я.	85
Тудейко А.С.	37	Юдин В.Е.	14, 35
Усова В.Н.	102	Юнусов Х.Э.	26
Ухарцева И.Ю.	44, 103	Яковлев В.Б.	135
Федоренко А.А.	83	Якубовская С.В.	41
Федоров А.Л.	130, 157	Янковский С.А.	47
Федосенко Н.Н.	123	Ярмоленко М.А.	143

Электронное
научное издание

Международная научно-техническая конференция
«ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ»
(ПОЛИКОМТРИБ–2022)

Тезисы докладов

Ответственные за выпуск:
И.Н. Ковалёва, 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, Беларусь

Телефон: +375 (232) 34 17 12;

Факс: +375 (232) 34 17 11

mpri@mail.ru

<http://mpri.org.by>