

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Международная научно-техническая конференция
**«Полимерные композиты
и трибология»**

International Scientific and Technical Conference
**«Polymer Composites
and Tribology»**



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-2017)

Гомель • Беларусь
27—30 июня 2017 г.
Тезисы докладов



ГОМЕЛЬ • 2017

УДК 620.22-419:678.01-621.891

ПОЛИКОМТРИБ-2017: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2017. — 248 с.

ISBN 978-985-6477-46-4

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, С.П. Богданович, Е.Н. Волнянко, П.Н. Гракович, А.Я. Григорьев, С.Ф. Ермаков, С.Ф. Жандаров, С.В. Зотов, Л.Ф. Иванов, И.Н. Ковалёва, В.Н. Коваль, Ю.М. Кривогуз, Е.Ф. Кудина, С.С. Песецкий, В.П. Селькин, В.П. Сергиенко, В.А. Смуругов, В.Е. Старжинский, Е.М. Толстопятков, В.А. Шелестова, С.В. Шилько, В.М. Шаповалов

Подписано в печать 20.06.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 70 экз. Заказ № 07-17

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., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	i
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	3
Достижения и перспективы трибологии	
Н.К. Мышкин, И.Г. Горячева, А.И. Свириденко	4
Multifunctionality of Polymer Composites in Tribology	
K. Friedrich	5
Nanomechanics and Nanotribology	
Feodor M. Borodich	6
Системный анализ физико-химических процессов в наполненных полимерных композитах	
Ю.М. Плескачевский	7
Многофункциональные композиты на основе насыщенных полиэфиров, модифицированных удлинителями цепи	
С.С. Песецкий, В.В. Шевченко	8
Влияние молекулярной массы на трибологические свойства аморфных полиариленаэфиркетонов	
А.П. Краснов, А.А. Аскадский, В.В. Шапошникова, С.Н. Салазкин, М.В. Горошков, А.В. Наумкин	9
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 1. Структура и свойства композиционных материалов	10
Устные доклады	11
Реологические свойства нано-композитов на основе клиноптиллолита и блок-сополимера пропилена с этиленом	
Н.Т. Кахраманов, Н.Б. Арзуманова	11
Многоуровневый мультифрактальный анализ свойств наноструктурных материалов и покрытий	
А.Г. Колмаков, М.Л. Хейфец, С.А. Клименко	12
Особенности структуры и свойств полиэтилентерефталат-гликоля и его смесей с полиэтилентерефталатом	
В.Н. Коваль, Н.В. Шевлик, С.С. Строгонова, Л.А. Щербина	13
Исследование структуры и физико-механических свойств искусственных кож	
В.А. Гольдаде, С.В. Зотов, В.Д. Борозна, А.Н. Буркин	14
Структура, реологические, механические и релаксационные свойства смесей ПЭТ/ПТЭП, модифицированных в расплаве удлинителями цепи и коротким стекловолокном	
В.В. Дубровский, В.В. Шевченко, В.Н. Коваль	15
ДСК/ТГ анализ композиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наночастиц SiO₂	
Л.Ю. Федоров	16
Напряжения третьего рода как фактор структурообразования	
А.Г. Анисович	17
Морфология и свойства гибридных композитов ПАБ, наполненных короткими волокнами и наночастицами	
С.П. Богданович, В.В. Дубровский, В.Н. Адериша, С.С. Песецкий	18

Исследование свойств жидкокристаллических полиэфиров и углепластиков на их основе А.И. Буря	19
Оптимизация состава бинарной смеси блок-полиуретанов с высоким уровнем свойств В.Н. Анисимов, Н.М. Евдокименко, М.В. Бурмистр	20
Стендовые доклады	21
Исследование влияния волокнистого гибридного наполнителя на абразивную износостойкость композитов А.И. Буря, О.А. Набережная	21
Исследование свойств керамических и полимерно-керамических светопоглощающих покрытий А.М. Валенков, В.М. Шаповалов, И.И. Злотников	22
Влияние структуры конструкционных тканей на прочность и жесткость создаваемых из них полимерных композитов Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая	23
Релаксационные свойства эластомерных композиций с азотсодержащими аддуктами канифоли К.В. Вишневыский, Н.Р. Прокопчук	24
Определение теплового поведения полимерных композитов на основе полиамида С.М. Данилова-Третьяк, Л.Е. Евсеева, С.А. Танаева, К.В. Николаева	25
Модифицированные нано-композиты на основе полиэтилена низкой плотности и каолина Н.Т. Кахраманов, Р.В. Курбанова	26
Влияние цинкосодержащих технологических добавок на особенности технических свойств наполненных эластомерных композиций С.Н. Каюшников, Н.Р. Прокопчук, Е.П. Усс	27
Нанокompозит на основе эластомерного полиуретана М.А. Ксенофонтов, Л.Е. Островская, В.С. Васильева	28
Механические свойства тонких нанокompозиционных покрытий Al-Si-N Т.А. Кузнецова, Т.И. Зубарь, В.А. Лапицкая, В.В. Углов, Н.Т. Квасов, В.И. Шиманский, С.А. Чижик	29
Заочные доклады	30
Исследование свойств нанокompозитных термопластичных эластомеров Н.И. Курбанова, Н.А. Алимйрзоева, А.М. Кулиев, Ф.С. Гулиева	30
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 2. Трибология	31
Устные доклады	32
Tribological Properties of a Purely Natural Composite: Black-Fiber Palm Wood Klaus Friedrich, Emmanuel I. Akpan, and Bernd Wetzels	32
Tribological Behaviours of Ball-Screw in Heavy Duty Injection Molding Machine J.H. Horng, Y.Y. Chen, and C.C. Yu	33
Теоретико-экспериментальное исследование разрушения при трении керамических покрытий, полученных методом микродугового оксидирования Е.В. Торская, А.Н. Любичева, М.А. Ляховецкий, Ю.В. Корнев	34
Сцепление колесо—рельс при подаче в область контакта частиц окалина или магнетита И.И. Соснов, Ю.Ю. Осенин, Ю.И. Осенин, А.В. Чесноков, О.В. Сергиенко	35
Некоторые особенности развития термодинамических процессов в зазоре подшипника скольжения В.Д. Тютюма	36
Исследование эрозионного износа материалов рабочих ступней УЭЦН Н.И. Смирнов, А.Н. Яговкина	37

Трибология линейных механизмов	
Н.И. Смирнов, А.Ю. Албагачиев, М.В. Прожега, Н.Н. Смирнов	38
Применение полимеров для управления трением в системе колесо—рельс	
С.М. Захаров, А.П. Краснов, М.В. Горошков, И.Г. Горячева	39
Многоцикловое испытание на трение методом атомно-силовой микроскопии	
Т.И. Зубарь, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик	40
Оценка износостойкости тонких нитридных покрытий на стальных подложках атомно-силовой микроскопией с алмазным зондом	
Т.А. Кузнецова, Б. Вархолински, Т.И. Зубарь, В.А. Лапицкая, А. Гилевич, С.А. Чижик	41
Моделирование и анализ движения твердых тел по плоской поверхности с асимметричным ортотропным трением	
Н.Н. Дмитриев, О.А. Силантьева, Е.М. Петроковец	42
Относительная статистическая флуктуация силы трения скольжения	
С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко	43
Модели движений и деформаций земной коры как приложения трибологии геоматериалов	
Л.М. Богомоллов, И.П. Дудченко, П.А. Каменев, И.А. Пантелеев	44
Стеновые доклады	45
Tribological Behaviour of the Self-Lubricating Polymers Against Steel 45 Using Different Velocity	
J. Padgurskas and G. Reškevičius	45
Композиционные пары трения скольжения прецизионного оборудования для высокоскоростной лезвийной обработки	
В.Л. Басинюк, А.С. Калиниченко, М.А. Леванцевич, Е.И. Мардосевич, А.А. Глазунова	46
Ресурс магнитожидкостных трибоузлов функционирующих в условиях вакуума или в атмосфере	
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова	47
Исследование процесса статического трения в полимер-полимерных микроподшипниках скольжения	
А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян, А.Э. Багдасарян	48
Закономерности трения при поперечной и поперечно-клиновой прокатках	
Г.В. Кожевникова	49
Повышение безопасности движения подвижного состава и обеспечение надежности и долговечности узлов трения вагонов	
В.И. Колесников, А.П. Сычев	50
Фрикционное взаимодействие абразивных композиционных материалов с монокристаллом алмаза	
А.М. Кузей, В.Д. Бабич	51
Методика определения трения покоя атомно-силовой микроскопией	
В.А. Лапицкая, Т.И. Зубарь, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик	52
Средства и методы контроля состояния поверхности трения по работе выхода электрона	
В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин	53
Методика исследования коэффициента трения композитов на испытательной машине Shimadzu Autograph AGS-X	
В.П. Селькин, О.С. Стерехов	54
Контактное взаимодействие многоуровневой системы инденторов с многослойным упругим полупространством	
Е.В. Торская	55

Численный анализ характеристик слоя вязкой смазки в опорном подшипнике скольжения при реверсивном движении П.П. Усов	56
Заочные доклады	57
Разработка расчетной модели упорного подшипника с учетом зависимости вязкостных характеристик от температуры К.С. Ахвердиев, Е.О. Лагунова, К.С. Солоп.....	57
Разработка расчетной модели упорного подшипника скольжения работающего на вязко-упруго-пластичном смазочном материале К.С. Ахвердиев, С.А. Солоп, К.С. Солоп	58
Избирательный перенос в нестационарных условиях трения Н.Ф. Дмитриченко, А.А. Миланенко, А.Н. Савчук, Ю.А. Турица	59
Упругая твердость и критерии пластичности дискретного контакта технических поверхностей В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, С.А. Чаплыгин.....	60
Трансформация структуры инструментальной керамики в условиях интенсивного фрикционного взаимодействия В.В. Кузин, С.Ю. Федоров	61
Трибомеханический анализ структурных изменений в поверхности высокоплотной керамики под воздействием вращающегося диска из закаленной стали В.В. Кузин, С.Ю. Федоров	62
К вопросу определения критериев перехода от упругого контакта к упругопластическому М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин	63
Демпфер с пористым анизотропным кольцом А.М. Мукутадзе	64
Расчетная модель радиального подшипника с учетом зависимости электропроводности, проницаемости и вязкости смазочного материала от давления М.А. Мукутадзе, А.Н. Гармония	65
Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, В.В. Василенко	66
Структурно-фазовые изменения в поверхностной зоне сталей с покрытием при трении скольжения с ресурсным смазыванием П.И. Маленко, А.Ю. Леонов, К.Д. Релмасира.....	67
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 3 Технологии и применение полимерных и композиционных материалов	68
Устные доклады	68
Особенности ультразвуковой сварки изделий из полукристаллических термопластов В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.Ф. Луцко, А.А. Казьмин, О.С. Попова.....	68
Окислительная гидрофилизация поверхности частиц структурированного углерода электрохимическим способом А.М. Валенков, В.В. Тимошенко	69
«One-Pot» синтез сульфированных поли-1,3,4-оксадиазолов на основе фталевых кислот В.С. Яценко, П. Р. Солтанмурадов, В.К. Ольховик.....	70
Функционализация смесей стирольных термоэластопластов с полипропиленом и их применение для модифицирования полиамида 6 Ю.М. Кривогуз, О.А. Макаренко	71
Трансформация молекулярной и надмолекулярной структуры поли-<i>l</i>-лактида при действии ионизирующего излучения Л.П. Круль, Г.В. Бутовская, А.В. Ермолинский, Л.Г. Резникова, Е.Д. Скаковский, Л.Ю. Тычинская.....	72

Макромолекулярные комплексы растениеводческого назначения на основе функционализованного полиакриламида Л.П. Круль, Е.В. Гринюк, Е.К. Фомина ¹ , О.И. Мамаев	73
Фотоуправляемые хиральные добавки для жидких кристаллов на основе азокрасителей и малеопимаровой кислоты В.С. Микulich, А.С. Яковлева, Ан.А. Муравский, М.П. Бей, Ал.А. Муравский	74
Трудногорючий пенополиуретан как огнетушащее средство М.М. Тихонов, В.В. Богданова	75
Исследование полноты отверждения эпоксидных смол терпеноидномалеиновыми аддуктами методом ИК-спектроскопии И.А. Латышевич, Г.Н. Лысенко, Н.Р. Прокопчук, А.Ю. Ключев, Н.Г. Козлов	76
Изменение характеристик наноструктурированного покрытия при импрегнировании полимером Д.А. Черноус, В.В. Хатько	77
Влияние химического состава воды на процессы гелеобразования неорганического полимера А.В. Антусёва, Е.Ф. Кудина, Г.Г. Печерский, Ю.Р. Кускильдина	78
Фотопревращения бриллиантового желтого в полимерных тонких пленках С.Н. Ларикова, Ж.Д. Чапланова, В.Е. Агабеков, Е.А. Грачева	79
Физико-химический анализ неравновесных процессов синтеза и применения конструкционных материалов и покрытий М.Л. Хейфец, А.Г. Колмаков, С.А. Клименко	80
Стендовые доклады	81
Эффективность газодинамического напыления и структурно-фазовый состав гетерогенного покрытия на основе наноконпозиционной матрицы AMg_2/графит + Al_2O_3 А.В. Аборкин, А.И. Елкин, Д.С. Хренов	81
Обжиг керамических материалов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в восстановительной атмосфере Ю.И. Бохан, А.А. Варнава	82
Термоэлектрический элемент с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления Ю.И. Бохан, А.А. Варнава	83
Звукопоглощающие композиты на основе льняных и полимерных волокон для интерьеров автотракторной техники С.Н. Бухаров, А.С. Тулейко	84
Поглотители энергии электромагнитного излучения оптического и СВЧ диапазонов на основе полимерных композитов Н.С. Винидиктова, В.А. Банный, А.И. Савицкий, Л.И. Краморева, Е.С. Петрова, Д.Б. Куликович	85
Исследование влияния гибридных модификаторов на свойства материалов на основе эпоксидной смолы Н.С. Винидиктова, Е.Ф. Кудина, О.А. Ермолович	86
Усадка и коробление аморфных и кристаллизующихся термопластов и композитов на их основе при переработке по экструзионно-прессовой технологии С.А. Герасименко	87
Новый хелатный сорбент Фибан ХС-1 для очистки воды В.И. Грачек, А.П. Поликарпов, А.А. Шункевич, Р.В. Марцынкевич, О.И. Исакович	88
Огнестойкость и трекинговая стойкость ПАБ, модифицированного синергической смесью антипиренов А.А. Давыдов	89
Разработка составов полимерного биоразлагаемого композита, подбор ультрадисперсных наполнителей и компатибилизаторов для формирования ленты методом экструзии О.В. Давыдова, Н.Е. Дробышевская, Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко, В.М. Шаповалов	90

Влияние модификаторов на вязкость резиновых смесей Р.М. Долинская, Н.Р. Прокопчук	91
Новый модификатор меламиналкидных олигомеров О.А. Кротова, Е.В. Бобович, Е.Ф. Кудина, Э.Т. Крутько	92
Модификация меламиналкидной смолы бициклическим диангидридом циклоалифатической тетракарбоновой кислоты Э.Т. Крутько, Т.А. Жарская, Е.В. Бобович	93
Создание материалов для покрытий на металлических поверхностях Е.Ф. Кудина, Н.С. Винидиктова, О.А. Ермолович	94
Причины снижения ингибирующей способности IRGANOX 1010 при прессовой обработке стабилизированного полиэтилена Е.М. Лапшина, Д.Г. Лин, Е.В. Воробьева, О.В. Конакова	95
Наноструктурированные сетчатые полиуретаны — перспективные материалы для защиты оборудования, эксплуатирующегося в агрессивных средах Н.Н. Ласковенко, Е.В. Лебедев	96
Применение пластифицирующих компонентов на основе вторичного нефтехимического сырья в эластомерных композициях А.В. Лешкевич, Ж.С. Шашок	97
Определение гидрофильно-гидрофобного баланса поверхности капиллярных ультрафильтрационных мембран с различным содержанием фуллеренола Г.Б. Мельникова, Е.С. Любимова, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич	98
Изготовление лабораторных образцов из композитов на основе порошков термопластичных полимеров и углеродных волокон А.С. Михневич, И.В. Мишин	99
Разработка технологий создания полимерных нанокомпозитов на основе СВМПЭ А.А. Охлопкова, Т.А. Охлопкова, Р.В. Борисова, Л.А. Никифоров, А.М. Спиридонов	100
Получение основы раневого покрытия из нановолокон хитозана методом электроформования Н.Р. Прокопчук, Ж.С. Шашок, Д.В. Прищепенко	101
Огнезащитная обработка полиэфирных волокон неорганическими антипиренами О.В. Рева, В.В. Богданова, А.Н. Назарович	102
Композитные криогели состава хитозан/ПВС и ПВС/желатин медицинского назначения О.С. Ремез, В.В. Паентко, В.М. Гунько, Ю.В. Матрунчик	103
Воздухопроницаемость гермослоев шинных резин, модифицированных слоистыми глинистыми силикатами В.Н. Усова, П.В. Васильев, Г.П. Валенчиц, Г.Н. Лейзеронк, С.П. Богданович, С.Н. Каюшников, С.С. Песецкий	104
Оптические свойства поливинилспиртовых пленок, содержащих дихроичные красители и полианилин Л.Н. Филиппович, С.Н. Шахаб, А.Н. Еремин, Н.А. Иванова	105
Перспективные материалы для деталей низа обуви В.М. Шаповалов, В.А. Гольдаде, С.В. Зотов, К.В. Овчинников, А.Н. Буркин, Н.М. Соколова, В.Д. Борозна, А.Н. Радюк	106
Разработка композиционных материалов на основе полимерных отходов с повышенным комплексом физико-механических характеристик В.М. Шаповалов, В.В. Тимошенко, К.С. Носов, О.Е. Пантюхов	107
Изучение влияния структуры и свойств волокнисто-пористых материалов на эксплуатационные характеристики фильтр-элементов В.Ю. Шумская, Л.А. Калинин	108

Покрытия на основе продуктов электронно-лучевого диспергирования ПВХ	
М.А. Ярмоленко.....	109
Заочные доклады	110
Галогенсодержащие термостойкие композиционные материалы на основе кремнийорганических диоксиранов	
О.В. Аскеров, В.А. Джафаров, А.Ф. Гулиева, Г.Д. Ханбабаева.....	110
Определение параметров наплавленных покрытий при изменении режимов лазерной обработки	
В.П. Бирюков, А.А. Фишков.....	111
Разработка акрилового форполимера для полимерного композита	
Г.В. Бутовская, И.А. Климовцова, Е.В. Гринюк, Л.П. Круль.....	112
Влияние способа формирования пленок на молекулярную и фазовую структуру поли-L-лактида с добавками стеарата полигексаметиленгуанидина	
Г.В. Бутовская, В.А. Тарасевич, В.А. Добыш, А.А. Федоренко	113
Синтез фоточувствительных полимеров на основе 2-замещенных циклопропилстиролов	
К.Г. Гулиев, Ц.Д. Гулвердашвили, А.И. Садыгова, А.М. Алиева, Д.Б. Тагиев	114
Реакционноспособный сополимер на основе 2-метоксикарбонилпарапропилстирола и глицидилметакрилата	
К.Г. Гулиев, С.Б. Мамедли, Ш.И. Багирова, Р.В. Джафаров, Р.М. Рзаев, А.М. Гулиев.....	115
Стабилизация полианилина поливинилпирролидоном и карбоксиметилцеллюлозой	
А.Н. Еремин, Х.А. Новик, Н.А. Иванова, Л.Н. Филиппович, С.Н. Шахаб.....	116
Дисперсионные среды для абразивной обработки металлов на основе водных бинарных композиций полиэлектролит-олигомер	
П.Н. Логвиненко, Т.В. Дмитриева, В.В. Бойко, Л.О. Карсим, Г.Ф. Невмержицкая, С.В. Рябов.....	117
Особенности формирования плазменных металл-полимерных покрытий из активной газовой фазы	
А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев.....	118
Модификация фенолформальдегидной смолы при производстве теплоизоляционных материалов	
Т.А. Савицкая, И.М. Кимленко, В.Е. Гайшун, Я.А. Косенок.....	119
Нанокоспозиционные металлополимерные плёнки на основе вольфрама и полистирола, модифицированные в плазме ВЧ разряда аргона	
А.В. Смирнов, В.С. Аткин, И.Д. Осыко, И.В. Синёв	120
Создание (био)разлагаемых полиуретанов с высоким содержанием природно-возобновляемых компонентов	
Т.В. Травинская, А.Н. Брыкова, Ю.В. Савельев.....	121
Обработка полимерных материалов высокоэнергетическим потоком порошковых частиц	
Ю.С. Ушеренко, С.М. Ушеренко, Т.В. Петлицкая.....	122
Электрические свойства приповерхностного слоя фоторезиста ФП9120, имплантированного ионами P⁺ и В⁺	
Д.В. Шестовский	123
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 4. Трибоматериаловедение	124
Устные доклады	125
Modelling of Microstructure and Analysis of Abrasive Wear of Manual Arc Welded Layers of Hadfield Steel	
V. Jankauskas, R. Choteborsky, M. Antonov, and E. Katinas.....	125
The Effect of Dopped Fullerene-Like Tungstene/Molybdenum Disulfide Nanoparticles on Friction, Wear, and Electrical Properties	
Alex Laikhtman, Lev Rapoport, and Meltem Sezen	126
Influence of Surface Treatment on the Operation Properties of Piezo-Electricactuators	
J. Padgurskas, A. Žunda, R. Rukuiža, V. Michailov, and A. Andriušis.....	127

Влияние оксида железа на трибоакустические характеристики высоконаполненных фрикционных композитов на основе ПТФЭ для узлов стационарного трения С.Н. Бухаров, В.К. Меринов, А.Н. Сенатрев, В.П. Сергиенко.....	128
Синтез и трибологические свойства наночастиц сульфидов переходных металлов О.П. Паренаго, Э.Ю. Оганесова, А.С. Лядов, Т.А. Займовская, Е.Ю. Бордубанова.....	129
Износостойкость подвергнутого ионному азотированию газотермического покрытия из мартенситной стали 40X13 А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко.....	130
Термофрикционная стабильность полимерных материалов в трибосистемах А.М. Пашаев, А.Х. Джанахмедов, М.Я. Джавадов.....	131
Теоретическое и экспериментальное исследование износа алмазного инструмента при контактном взаимодействии с металломатричным композиционным сплавом А.И. Залеснов, И.М. Букарев, В.В. Рябкова.....	132
Характеристика гидроабразивной износостойкости полиэтиленовых трубопроводов по величине Дармштадтского ресурса И.В. Князькина, В.В. Коврига.....	133
Изучение коэффициента трения объемных гранул из матричного композита на основе сплава AMg2, содержащего нанокристаллический графит А.В. Аборкин, А.В. Шакиров.....	134
Формирование и трибологические свойства композиционных пленок Ленгмюра – Блоджетт стеариновой кислоты с дисульфидом молибдена и аморфным углеродом А.Е. Соломянский, В.Е. Агабеков.....	135
Влияние мезоморфизма на смазочные свойства жидкокристаллических наноматериалов при граничном трении К.С. Бурченков, В.В. Новиков, Светлана А. Сырбу, Р.Ю. Лисицын, М.С. Маршалов.....	136
Моделирование смазочных процессов при шлифовании стекла в водных растворах поверхностно-активных веществ В.В. Новиков, Светлана А. Сырбу, А.Г. Наумов.....	137
Триботехнические особенности экологически чистых смазочных материалов на основе растительных масел С.Ф. Ермаков, Т.Г. Чмыхова, А.Л. Богданов, А.В. Тимошенко.....	138
Влияние легирования монокристаллического углеродного покрытия-ориентанта на антифрикционные свойства характерных смазочных композиций И.А. Буяновский, А.Н. Большаков, В.А. Левченко.....	139
Координационное соединение диоксимолибдена — перспективная присадка к моторным маслам А.Г. Пономаренко, А.С. Бурлов, М.В. Бойко, А.Г. Галкина, Т.А. Ширяева, Т.Г. Бойко, М.В. Никогосов.....	140
Применение спеченных порошковых фрикционных материалов в узлах трения тракторов Минского тракторного завода А.А. Дмитриевич, А.Н. Роговой, А.В. Лешок.....	141
Повышение трибомеханических свойств сплава АК7 керамическим покрытием, модифицированным шунгитовым наноглеродом А.И. Комаров, В.И. Комарова, Н.Н. Рожкова, П.С. Золотая.....	142
Структура и свойства сплава АК7, модифицированного наноконпозицией SiC-Al₂O₃ А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда, Д.О. Искадарова.....	143
Воздействие наночастиц TiC-Al₂O₃ на структуру и трибомеханические свойства покрытий, полученных микродуговым оксидированием на сплаве Д16 А.И. Комаров, В.И. Комарова, С.А. Чижик, Т.А. Кузнецова, Т.И. Зубарь.....	144

Модифицирование поверхности бутадиен нитрильных резин углеродными покрытиями М.А. Попова, В.Ю. Галась.....	145
Разработка нового метода диффузионного введения упрочняющих элементов в поверхностные слои стали Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников, Е.С. Новиков.....	146
Взаимодействие фосфатных и силикатных присадок с окисленной поверхностью железа Ю.Ф. Мигаль, И.А. Майба, К.И. Карпенко.....	147
Стендовые доклады	148
Performance Evaluation of Environmentally-Friendly Grease A. Kupčinskas, R. Kreivaitis, and G. Venckevičius.....	148
Применение функциональных присадок для повышения термоокислительной стабильности тепловозных масел М.О. Бабушкин, Е.Н. Волнянко	149
Технология получения пластичных смазочных материалов на комплексных кальциевых мылах с использованием промежуточных продуктов нефтепереработки А.Л. Богданов, С.Ф. Ермаков.....	150
Влияние γ-излучения на прочностные и триботехнические характеристики полиэтилена С.П. Богданович, В.М. Станкевич	151
Износостойкость покрытий системы CrN/AlN, полученных магнетронным распылением И.М. Букарев, А.И. Залеснов, А.В. Соболюков	152
Тонкослойная хроматография смазок из растительных масел А.Я. Григорьев, И.Н. Ковалёва	153
Ni-P покрытия в высокоскоростных узлах трения Д.М. Гуцев, Л.Ф. Иванов, Е.Э. Дмитриченко, А.Я. Григорьев	154
Влияние структуры дисперсной фазы пластичной смазки на ее механическую стабильность В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник, А.В. Запольский.....	155
Обоснование выбора материалов при конструировании полимер — полимерных узлов трения А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян, А.Э. Багдасарян	156
Влияние металлических наполнителей на триботехнические и теплофизические свойства фрикционных материалов И.М. Крижевский, Т.А. Ахметов	157
Испытания модельных трибосопряжений “труба—дистанционирующая гребёнка” парогенератора реакторной установки со свинцовым теплоносителем В.В. Лемехов, В.Д. Сизарёв, С.В. Столотнюк, Ю.В. Лемехов, Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин, Т.И. Муравьёва, И.А. Солдатенков, С.В. Васильев.....	158
Фрикционные композиты на основе минералов армянского месторождения Н.Г. Меликсетян.....	159
Триботехнические свойства углеродных покрытий, легированных металлами из плазмы дугового и магнетронного разряда А.В. Рогачев, А.С. Руденков, Д.Г. Пилипцов, Сянь Хун Джанг, Н.Н. Федосенко.....	160
Исследование триботехнических характеристик алюминиевого сплава, легированного железом Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин.....	161
Влияние внешних температурных воздействий на прочностные и триботехнические свойства фрикционных накладок В.П. Сергиенко, И.Ю. Симонюк, А.С. Тулейко	162

Исследование трения смеси сверхвысокомолекулярного полиэтилена с модифицированным дигидрокверцетином	
В.А. Соловьёва, А.П. Краснов, Э.Е. Саид-Галиев, А.В. Наумкин, Н.С. Гаврюшенко	163
Изменение поверхности антифрикционных алюминиевых сплавов в процессе трения	
О.О. Щербакова, Т.И. Муравьёва, Д.Л. Загорский, Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин	164
Заочные доклады	165
Повышение износостойкости при лазерной наплавке	
В.П. Бирюков, Д.Ю. Татаркин, Е.В. Хриптович, А.А. Фишков	165
Улучшение противоизносных свойств авиакеросинов с помощью жирных кислот растительного происхождения	
А.К. Горюнова, Н.М. Лихтерова, К.В. Шаталов	166
Плазменное поверхностное легирование сплава Ti-6Al-4V	
А.П. Ласковнев, Н.Н. Черенда, А.В. Басалай, В.В. Углов, В.И. Шиманский, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий	167
Исследование трения ультратонких силоксановых покрытий	
А.В. Наумкин, М.В. Горошков, И.О. Волков, О.И. Щеголихина, А.А. Анисимов, Н.С. Гаврюшенко, Ю.С. Высочинская, А.П. Краснов	168
Влияние термообработки фенолоформальдегидных композитов на их трибологические свойства	
М.О. Панова, Д.И. Буюев, Н.Д. Каграманов, Ю.Н. Смирнова, Л.Ф. Клабукова, А.П. Краснов	169
Улучшение трибологических свойств минерального масла 10W40 применением пластинчатых хлопьев окисленного графита	
А.В. Сидашов, А.Т. Козаков, Н. Кумар, В.И. Колесников	170
Особенности взаимодействия природного графена с жидкими кристаллами в антифрикционных композициях	
Н.Н. Рожкова, А.В. Казак, А.И. Смирнова, Н.В. Усольцева, М.В. Козинец, А.А. Гвоздев	171
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 5. Фторполимеры: получение, исследования, применение	172
Устные доклады	172
Исследование влияния комплексных наполнителей на эксплуатационные свойства политетрафторэтилена	
А.А. Охлопкова, Т.С. Стручкова, А.П. Васильев, А.Г. Алексеев, П.Н. Гракович	172
Способ качественного анализа состава композитов на основе фторопласта-4	
А.Л. Башлакова	173
Трибохимические процессы и износостойкость политетрафторэтилена, наполненного термо-расширенным графитом	
В.Н. Адериha, В.А. Шаповалов	174
Углеродный наполнитель для фторполимеров УВИ-ПХО	
П.Н. Гракович, В.А. Шелестова, М.В. Полховский, А.А. Сарычев	175
Технология плазмохимической обработки углеродных наполнителей для композиционных материалов на основе фторопласта-4	
Л.Ф. Иванов, В.М. Макаренко, А.В. Шаповалов	176
Износостойкие ПТФЭ-композиты, содержащие диоксид кремния	
Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, О.В. Чемисенко, С.С. Акименко	177
Laser Ablation of e-Beam and γ-Ray Treated Polytetrafluoroethylene	
E.M. Tolstoplyatov and U. Gohs	178
Химические причины аномального поведения волокон ПТФЭ, полученных при лазерной абляции ПТФЭ, при их нагревании или повторной лазерной абляции	
М.М. Гут, Е.М. Толстопяттов	179

Химические особенности формирования фторполимерного покрытия на поверхности углеродных волокон в плазме октафторциклобутана М.М. Гут.....	180
Опыт продвижения новых наукоемких материалов на основе фторопласта И.С. Шилько, Д.В. Ерохин.....	181
Стеновые доклады	182
Квазипериодические эффекты плазмохимического модифицирования поверхности в длинном реакторе Н.П. Глазырин, Л.А. Калинин.....	182
Электронно-микроскопическая оценка модифицирования поверхности фторопласта «Грифтекс» П.Н. Гракович, В.В. Кудло, И.Г. Жук, И.С. Цыдик.....	183
Исследование модуля упругости и микротвердости тонких пленок политетрафторэтилена наноиндентированием Т.И. Зубарь, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик, А.А. Рогачев.....	184
Триботехнические характеристики композитов на основе термопластичных фторполимеров наполненных углеродными волокнами В.П. Селькин, А.В. Макаренко	185
Триботехнические характеристики композиционного материала на основе ПТФЭ и модифицированных в низкотемпературной плазме углеродных волокон М.Ю. Целуев, И.В. Коваль, Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий	186
Влияние содержания углеродных волокон на физико-механические характеристики композиционных материалов на основе ПТФЭ М.Ю. Целуев, В.А. Шелестова.....	187
Заочные доклады	188
Влияние фторорганической обработки углеродных волокон на свойства полиэтиленовых углекомпозитов Е.С. Петухова, П.Н. Гракович.....	188
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 6. Механика полимерных композитов и моделирование	189
Устные доклады	190
Особенности пластического разрушения сополимеров этилена В.В. Коврига	190
Пластическое разрушение в полиэтиленовых трубах с различными сроками эксплуатации В.Г. Колбая, В.В. Коврига.....	191
Исследование прочности сварных соединений, топографии околошовной зоны методом раздира армирующим элементом А.С. Васильева, Д.А. Черников, Н.В. Прокопьев, Е.И. Зайцева, В.В. Коврига.....	192
“Alternative” Method of Pull-Out Test Evaluation with Real Specimen Geometry S.F. Zhandarov and E. Mäder	193
On the Range of Embedded Fiber Lengths in the “Indirect” Approach to Local Interfacial Shear Strength Determination in the Microbond and Pull-Out Tests S.F. Zhandarov, P.N. Grakovich, and U. Gohs.....	194
Моделирование теплопроводящих свойств антифрикционных композитов с неизометричными включениями В.И. Колесников, И.В. Лавров, В.В. Бардушкин, А.П. Сычев, А.А. Сычев, В.Б. Яковлев.....	195

Моделирование взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью при магнитореологическом полировании	
М.Л. Левин, А.Л. Худолей	196
Фотодефлекционная спектроскопия низкоразмерных структур	
Г.С. Митюрин, Е.В. Лебедева, В.В. Кожушко, А.Н. Сердюков.....	197
Определение и анализ комплекса физико-механических характеристик направленно-армированных углепластиков	
Т.В. Рябченко, С.В. Шилько, И.В. Ермолкевич, С.И. Романович	198
Градиентные материалы с позиций контактной механики	
С.В. Шилько, Т.В. Рябченко, М.В. Зернин, Н.Н. Рыбкин	199
Идентификация линейной вязкоупругой модели Прони по данным динамического механического анализа	
С.Л. Гавриленко, С.В. Шилько, Ю.К. Машков, О.В. Кропотин	200
Стендовые доклады	201
Зависимости между напряжениями и деформациями в препрегах полимерных композиционных материалов	
Ю.В. Василевич, К.А. Горелый, С.В. Сахоненко, А.В. Сахоненко	201
Теоретико-экспериментальное изучение жесткости прокладки-демпфера с текстурированной поверхностью	
И.Г. Горячева, Е.В. Торская, Ф.И. Степанов, Н.К. Мышкин, А.В. Купреев.....	202
Моделирование распределения электромагнитного поля в ближней зоне сферической наночастицы с использованием конечного элемента в виде тетраэдра	
К.С. Курочка, Д.Н. Трубенюк	203
Бимодальное распределение значений модуля упругости в пленках нанокompозитов на основе мультимольных сополиуретанимидов	
В.А. Лапицкая, Т.Е. Суханова, Т.А. Кузнецова, Т.И. Зубарь, А.Л. Диденко, С.А. Чижик.....	204
Исследования свойств пластмасс, используемых в аддитивных технологиях, в зависимости от программ-слайсеров	
Е.В. Шалобаев, С.Л. Гавриленко, Ф.А. Перепелица, Н.С. Красноручская, Г.А. Демидов	205
Заочные доклады	206
Исследование влияния углеродных волокон на свойства и структуру композитов на основе СВМПЭ	
О.В. Гоголева, И.С. Шилько	206
Численная реализация методики по определению напряжений в трубе с податливой оболочкой и полиуретановой теплоизоляцией	
В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, Е.А. Голубева, Р.А. Аль-Абси.....	207
Учет опыта живой природы при проектировании разветвляющихся композитных структур	
А.Н. Полилов, Н.А. Татусь	208
Влияние гидратационной воды в силикатах на триботехнические свойства ПТФЭ	
С.А. Слепцова, М.М. Макаров, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева, В.И. Федосеева	209
Принципы моделирования структуры композиционных пористых покрытий	
В.М. Таран, А.В. Лясникова, И.П. Гришина, О.А. Дударева, О.А. Маркелова.....	210
Исследование механизмов вулканизации бутадиен-нитрильного каучука фенолоформальдегидными смолами методом инфракрасной спектроскопии	
А.А. Сементовская	211
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ. Секция 7. Медико-биологические аспекты применения полимерных и композиционных материалов	212
Устные доклады	212
Антибактериальная активность пектинов и нанокompозитов пектин-Аg	
К.С. Гилевская, Е.И. Ладутько, Г.И. Новик	212

Характеристики пространственного распределения значений механических свойств в поверхностном слое биологических клеток по данным атомно-силовой микроскопии М.Н. Стародубцева, И.Е. Стародубцев, Н.И. Егоренков	213
Частицы пектината кальция, содержащие коричную кислоту А.Н. Красковский, В.И. Куликовская	214
Применение биомеханических моделей гемодинамики для мониторинга тренировочного процесса Ю.Г. Кузьминский, М.В. Борисенко	215
Деформация поверхности вибротода — источник поличастотного воздействия на пациента Д.И. Сагайдак, Ю.Г. Кузьминский.....	216
Импланты для стоматологии и ортопедии из полиарилэфирэфиркетона и композитов на его основе С.В. Орлов, А.В. Чесноков, В.А. Старцев, И.А. Тимофеев.....	217
Сыворотка крови как биолубрикант и ее влияние на клиническое проявление остеоартроза В.И. Николаев, С.Ф. Ермаков	218
Композиты на основе полистирола, содержащие кластеры фуллеренов и фуллеридов металлоценов Э.М. Шпилевский, Н.П. Кулиш, О.С. Филатова, Г. Шилагарди, П. Тувшинтур.....	219
Изучение влияния полимерных наночастиц на структурно-механические свойства мембран эритроцитов методом атомно-силовой микроскопии Г.Б. Мельникова, Т.Н. Толстая, Е.Э. Константинова, С.А. Чижик, Н. Антонова	220
Мультислойные пленки на основе полигексаметиленгуанидина и карбоксиметилцеллюлозы А.Н. Красковский, В.А. Добыш, Н.А. Белясова, В.И. Куликовская, В.А. Тарасевич	221
Гидрогелевая система доставки куркумина на основе частиц конъюгата хитозана с фолиевой кислотой М.Э. Лозовская, В.И. Куликовская, В.Е. Агабеков	222
Стендовые доклады	223
Computer Controlled Articulator Driven by Patient’s Specific TMJ Kinematics Obtained from Jaw Tracking Device for the Purpose of Testing and Analysis of Different Materials in Bio-Mechanical Applications Yevsey Gutman and John Keller	223
Новые полимерно-волокнистые композиционные материалы с антибактериальными свойствами В.И. Дубкова, А.В. Караваева, М.В. Соловский, Е.Ф. Панарин, О.И. Маевская, Н.А. Белясова	224
Биофизические аспекты разработки материала для эндопротеза кровеносного сосуда К.В. Овчинников, Т.Ф. Овчинникова, Е.А. Цветкова, И.Ю. Ухарцева, Ж.В. Кадолич	225
Контрастирующие свойства наночастиц ферритов, стабилизированных полиэлектролитной оболочкой Т.Г. Шутова, С.А. Хоружик, В.В. Паньков, К.С. Ливонович	226
Заочные доклады	227
Биоцидные композиции на основе ПВХ и серосодержащих эпоксициклопропанов Р.З. Шахназарли, Г.А. Рамазанов, А.М. Гулиев.....	227
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	228

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТРИБОЛОГИИ

Н.К. Мышкин, И.Г. Горячева, А.И. Свириденко

¹Институт механики металлполимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия³Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения, Гродно, Беларусь

Рассмотрены итоги развития трибологии — междисциплинарной концепции Питера Джоста, ставшей ключевой с 1966 года в анализе процессов трения, смазки и изнашивания [1]. Оценен прогресс механики контактного взаимодействия, физики и химии поверхностных процессов, как фундаментальных основ трибологии [2]. Отмечено, что создание новых материалов и смазок, прогресс в конструировании трибосистем обеспечили развитие приложений трибологии во всех отраслях промышленности, на транспорте, а также в биологии и медицине [1].

Указано, что расходы на восстановление машин в результате износа огромны, а увеличение срока их службы равносильно вводу новых производственных мощностей. Кроме того, больше половины топлива, потребляемого на транспорте, расходуется на преодоление сопротивления, создаваемого трением в машинах и в контакте с дорогой. Около 25% энергии расходуется на преодоление трения [1]. В целом потери, связанные с трением и износом машин, оцениваются в 3—5% валового национального продукта развитых стран.

Отмечено, что приложения трибологии вышли далеко за рамки техники — огромное значение приобрели ее биологические и медицинские аспекты, изучение трения в живой природе и использование его результатов в технике. Подчеркнута важная роль принципа “зеленой трибологии”, так как во всем мире остро стоят проблемы загрязнения биосферы.

Поэтому снижение потерь на трение и экономия энергии, уменьшение износа машин и механизмов, влекущее за собой экономию материалов и снижение вредных выбросов; применение экологически чистых смазок стали актуальными проблемами [1, 2].

Все более актуальным является развитие трибологии применительно к узлам трения микро- и наномеханизмов, в т.ч. космического назначения, продлению “жизни” человеческих суставов, разработкам трибосистем с активным контролем характеристик, и многим другим актуальным и перспективным задачам [3].

Оценен рост публикаций в области трибологии, роль журналов, международных и национальных конгрессов и конференций на всех континентах. В этой связи отмечена роль журнала “Трение и износ” в координации усилий специалистов стран СНГ в глобальном потоке информации в области трибологии [3].

1. Abstracts // Int. Conference “50th Anniversary of the “Jost Report”. — London: IMech. — 2016
2. Мышкин Н.К., Горячева И.Г. Трибология: Тенденции полувекового развития // Трение и износ. — 2016 (37), № 6, 665—669
3. Свириденко А.И., Мышкин Н.К., Ковалева И.Н. Актуальные направления развития трибологии на страницах журнала “Трение и износ” // Трение и износ. — 2015 (36), № 6, 591—594

MULTIFUNCTIONALITY OF POLYMER COMPOSITES IN TRIBOLOGY

K. Friedrich

Institute for Composite Materials, Kaiserslautern, GERMANY; friedrich@ivw.uni-kl.de

Introduction to Multifunctionality. Multifunctionality is the combination of different properties in one material so as to make it suitable for the use in applications in which different loading conditions must be sustained. Besides the mechanical load bearing capacity, other properties such as thermal stability, electrical conductivity or wear resistance can be of importance (fig. 1) [1].

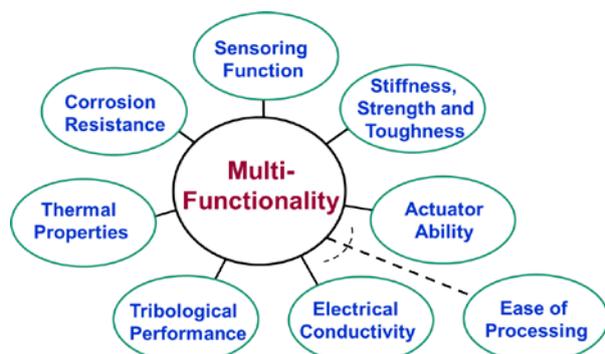


Fig. 1. Various properties for a material to become multifunctional

In many cases, polymer based composites are the material of choice, since they can combine the intrinsic properties of the polymers (e.g. light weight, corrosion resistance, or toughness) with the unique properties of their reinforcements, such as electrical conductivity, wear resistance, or high mechanical stiffness and strength. Various case studies illustrate how to achieve various property combinations for different tribological applications.

Case Study I: Ball Bearings in Mining Industry.

Polymeric ball bearings used in the mining industry need to be self-lubricating, and must have low friction and wear, a balanced mechanical property profile, as well as a certain degree of electrical conductivity for dissipating tribo-charges from high speed motion (electrostatic discharge) [2].

Because of their outstanding intrinsic, mainly mechanical and electrical properties, multi-wall carbon nanotubes (MWNTs) as functional fillers are of great interest in this respect. Especially a combination of nano- (e.g. MWNTs) and micro-scale fillers (such as short carbon fibers SCF and graphite Gr) is expected to provide a good potential for optimizing composite properties. In the present case study it was clearly demonstrated that MWNT in a poly-phenylenesulfide (PPS) matrix are the most effective filler for realizing electrical conductivity, whereas SCF are favorable to improve the mechanical and tribological properties. Gr is good for improving the friction properties too. The multi-modally

filled composites resulted in the best overall property profile (fig. 2) [3].

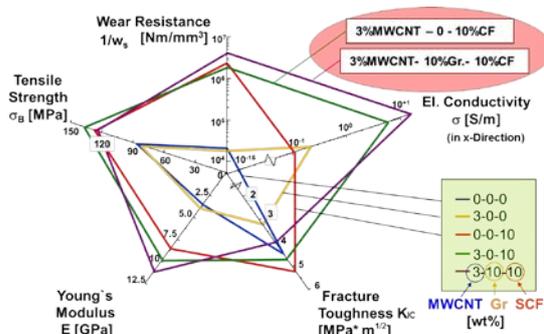


Fig. 2. Property combination of various PPS composites

Case Study II: Hybrid Bushings in Diesel Fuel Injection Pumps.

Several years ago, there was a big recall action of Diesel fuel injection pumps due to the failure of the internal PTFE composite coatings in the hybrid bushings used. A new development had to be started to improve the type of matrix and its reinforcements in order to fulfil the new multi-functional requirements.

The final solution led to a polyetheretherketone (PEEK) matrix, filled with nano- and microsized filler particles. The addition of nanoparticles resulted in an improved performance in wear and a lower coefficient of friction under room-temperature testing conditions, and this tendency could also be preserved when the materials were tested in sliding over smooth steel counterparts at elevated temperatures. The new nanoparticle modified PEEK composites exhibited a much lower coefficient of friction and a significantly lesser specific wear rate, especially at elevated temperatures (up to 225 °C) [4, 5]. At the same time, its chemical resistance to aggressive Diesel fuel was preserved, and the nanofillers also enhanced the load bearing capacity, especially in the high temperature range.

- Friedrich K., Breuer U. (eds.), Multifunctionality of Polymer Composites. — Elsevier. — 2015
- www.igus.co.uk/wpck/7768/xiros_F180_Leitfaehig
- Noll A., Friedrich K., et. al.: Effective Multifunctionality of Poly(p-phenylenesulfide) Nanocomposites Filled with Different Amounts of Carbon Nanotubes, Graphite and Short Carbon Fibers // Polymer Composites. — 2013, no. 34,9, 1405—1412
- Hauptert F., et. al.: Tribological Behavior of Nanoparticle Reinforced Polymeric Coatings, Proc. 14th Int. Colloquium Tribology, Stuttgart, Germany, January 13—15. — 2004, 5—11
- Oster F., et al.: Tribologische Hochleistungsbeschichtungen aus neuartigen Polyetheretherketon (PEEK)-Compounds // Tribologie und Schmierungstechnik. — 2004, no. 51,3, 17—24

NANOMECHANICS AND NANOTRIBOLOGY

Feodor M. Borodich

Cardiff Nano-Science and Nano-Engineering Cross-Disciplinary Group (NanoSNEG),
School of Engineering, Cardiff University, UK

The talk is devoted to development of modern nanomechanics and nanotribology. The author defines nanomechanics as a scientific discipline that studies (i) application of mechanical laws and solutions of problems of mechanics to objects of nano-technology; (ii) interactions between physical objects using mechanical equations adjusted to the specific character of the interactions and object structures at nanometre length scale; and (iii) influence of nanometre scale objects and processes on meso/macroscale phenomena. Various examples of problems of nanomechanics and nanotribology are presented of these three types are presented. The first type includes some problems AFM tip-based nanomachining, classic depth-sensing nanoindentation, and non-adhesive contact with stretched graphene membranes. One of specific features for the nanometre length scale is adhesion. It is suggested to employ a new method for determination of the work of adhesion for novel materials - the modified BG (Borodich-Galanov) method. It has been shown that the JKR theory can be extended to arbitrary blunt axisymmetric solids and to materials having rotational symmetry like transversely

isotropic or homogeneously prestressed materials. The relations between the load, the contact radius and the displacements in adhesive contact for power-law shaped probes reduced to very simple universal dimensionless equations. It is argued that the friction depends on several scales: nano (atomic and nano), micro and macro that should be involved in the roughness description. Statistical approaches show that roughness of engineering surfaces prepared by grinding is Gaussian neither at nano nor at micro scales. Concept of representative elementary pattern of roughness (REPR) is introduced. It is argued that it has a great potential for computational nanomechanics and nanotribology. Finally, structural multi-level and multiscale hierarchical models of surface roughness are presented. The models reflect the dual nature of friction: mechanical and adhesive interactions between counterparts. Numerical simulations show that the force of friction is not constant; it depends on the local features of the roughness profile of the substrate. However, in general the Amontons law is confirmed.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

Ю.М. Плескачевский

Институт механики металлполимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
pleskym@mail.ru

Наполнение полимерных матриц различными по природе и геометрии ингредиентами является весьма эффективным направлением расширения номенклатуры, модифицирования свойств и, соответственно, разнообразия сфер применения полимерных композитов. Однако, на разных стадиях технологических процессов формирования изделий, как на основе термопластичных, так и терморезистивных полимерных материалов, в объеме полимерной матрицы и на границах раздела протекают различные физические, физико-химические, химические процессы, знание которых и разработка приемов управления ими могут обеспечить заданный уровень технологических и эксплуатационных свойств полимерных композитов и изделий из них.

В докладе проанализированы явления, протекающие в формируемом композите на различных структурных уровнях и фазовых состояниях.

Молекулярный уровень анализа предполагает учет основных характеристик макромолекул, таких как термодинамическая гибкость, обусловленная тепловым движением, кинетическая гибкость, проявляющаяся в поле внешних механических сил, сегмент Куна, конформационная статистика полимерных цепей. Важными параметрами при этом являются молекулярно-массовое распределение, различные несовершенства молекулярной структуры, что в совокупности с неизбежно присутствующими в исходном полимерном материале различных примесей обуславливает те или иные стерические ограничения. С другой стороны, все вышеперечисленное должно рассматриваться по меньшей мере в граничных слоях с учетом комплекса свойств наполнителя.

Подобный алгоритм анализа молекулярного уровня уместен как для термопластических, так и для терморезистивных матриц.

Для большинства кристаллизующихся полимерных материалов особым и мало изученным является состояние переохлажденного расплава. Кристаллизация лимитируется соотношением скоростей двух процессов — образования зародышей и роста собственно кристаллов. Парадокс в том, что максимум скорости образования зародышей находится в области более низких температур, чем интервал оптимальных скоростей кристаллизации, что «не стыкуется» с принятыми в технологиях переработки термопластов в изделия, когда формирование последнего осуществляется в процессе охлаждения расплава. В докладе рассмотрены предкристаллизационные, микрореологические, каталитические, адсорбционные, окислительно-восстановительные и другие явления в расплаве полимерной матрицы с наполнителем, предложен принципиально новый механизм кристаллизации полимеров.

Рассмотрены процессы на надмолекулярном уровне (фазовый переход расплав-твердое тело, формирование межфазного слоя, монолитизация системы и др). Проанализированы основные факторы, определяющие свойства полимерного композита, предложен алгоритм формирования тех или иных эксплуатационных свойств. Указано на необходимость учета при этом особенностей используемых технологий, приведены нетрадиционные и перспективные области применения активных, адаптивных и умных полимерных композитов.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ НАСЫЩЕННЫХ ПОЛИЭФИРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УДЛИНИТЕЛЯМИ ЦЕПИ

С.С. Песецкий, В.В. Шевченко

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; otel5mpri@tut.by

Обобщена и систематизирована информация о макромолекулярных превращениях, имеющих место в расплавах насыщенных полиэфиров, а также композитах на их основе. Особое внимание уделено рассмотрению специфики взаимодействия удлинителей цепи, и, в частности, различных изоцианатсодержащих продуктов с макромолекулами полиэфиров.

Приведены результаты оригинальных исследований анализа межцепных взаимодействий полиалкилентерефталатов (ПАТ) с ароматическими, алифатическими и олигомерными диизоцианатами. При этом установлено, что химическое взаимодействие диизоцианатных УЦ с макромолекулами ПАТ в расплаве в экструзионном реакторе-смесителе протекает по концевым гидроксильным и карбоксильным группам, а также при реакциях изоцианатных групп с вновь образованными амидными группами. Вследствие этого при относительно малых концентрациях УЦ (0,5—1,2%) происходит увеличение молекулярной массы полиэфиров и частичное межмолекулярное сшивание макромолекул, что приводит к увеличению $[\eta]$ полиэфиров до двух и более раз и снижению ПТР в 5—40 раз. Эффективность действия диизоцианатов, как УЦ, зависит от их природы и типа полиэфира. Эффект повышения вязкости расплавов ПАТ, химически модифицированных добавками УЦ, позволяет при использовании высокоиндексных полиэфиров создавать композиты с высокой вязкостью (ПТР = 0,2—5,0 г/10 мин) и прочностью расплава, пригодные для переработки по экструзионным технологиям.

Добавки УЦ затормаживают кристаллизацию ПАТ независимо от типа полиэфира и снижают кристалличность материалов вследствие кинетических затруднений. По данным релаксационной спектроскопии УЦ практически не влияют на сегментальную подвижность и повышают динамический модуль сдвига в застеклованном полиэфире. Добавки УЦ по мере увеличения их концентрации изменяют характер деформационных кривых: происходит увеличение верхнего и нижнего пределов текучести и снижается различие в значениях данных показателей, то есть зуб текучести вырождается.

В смесях ПАТ, помимо повышения молекулярной массы компонентов, добавки УЦ способствуют компатибилизации за счет интенсификации межцепных взаимодействий и частичного сшивания разнородных макромолекул. В связи с этим, при смешении разнородных ПТЭП, отличающихся по твердости, или ПБТ и мягких модификаций полиэфирных блок-сополимеров открываются возможности создания большого ассортимента композитов со свойствами термоэластопластов и твердостью по

Шору D, изменяющейся в пределах 33—65 усл.ед. Экспериментально (по сближению значений T_g) обоснован эффект компатибилизации добавками УЦ смесей ПЭТ/ПК, содержащих модификатор ударной вязкости (ПП/ЭПДМ), что обусловлено интенсификацией межфазного взаимодействия.

При сравнительном анализе молекулярной структуры, релаксационных и механических свойств ПЭТ и его композитов, содержащих добавки углеродных нанонаполнителей и УЦ, показано, что реакции, приводящие к удлинению цепи, активно протекают в присутствии МУНТ и технического углерода. В то же время замедление кристаллизации ПЭТ, происходящее в исходном полимере под влиянием УЦ, нивелируется в присутствии нанонаполнителей, причем наиболее ярко данный эффект проявляется в композитах, содержащих МУНТ. Малые (0,01—0,05%) добавки МУНТ способствуют получению нанокompозитов с высокой деформационной способностью (ϵ_p достигает 440%) и повышенной в 1,3—1,6 раз истинной прочностью.

Установлен эффект интенсификации межфазной адгезии в полиэфирных композитах, в том числе на базе смесей полиэфиров, армированных короткими СВ, в присутствии добавок УЦ. Данный результат открывает возможности получения стеклонаполненных композитов с улучшенным комплексом реологических и прочностных характеристик.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о широких перспективах создания новых типов конкурентоспособных полиэфирных композитов при использовании для их получения полиэфирных матриц химически модифицированных в расплаве УЦ. Особый интерес при этом представляют разнообразные наполненные композиты, в том числе содержащие гибридные наполнители, например, короткие волокна и наночастицы, способные к хемосорбционному взаимодействию с изоцианатными группами, смесевые полиэфирные материалы, в том числе наполненные, нанокompозиты и т.п. Полученные данные важны также для технологии экструзионных материалов с высокой прочностью и вязкостью расплава.

1. Pesetskii S.S., Shevchenko V.V., and Dubrovsky V.V. Reactive Compatibilization in Technology of Poly(alkylene terephthalate) — Based Composites: Polyester Blends, Short Fiber-Filled Materials, and Nanocomposites / In: Multifunctionality of Polymer Composites, editors K. Friedrich and U. Breuer. — Elsevier, Oxford. — 2015 (9), 302—337
2. Pesetskii S.S. and Shevchenko V.V. Obtaining, Structure and Properties of Multifunctional Composites Based on Saturated Polyesters Modified with Isocyanate Chain Extenders / In: Isocyanates: Advances in Research and Applications. EdS. G. Bennett. — Nova Science Publishers, USA. — 2017, (1), 1—56

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ ПОЛИАРИЛЕНЭФИРКЕТОНОВ

А.П. Краснов, А.А. Аскадский, В.В. Шапошникова,
С.Н. Салазкин, М.В. Горошков, А.В. Наумкин

Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия; krasnov@ineos.ac.ru

Исследование общих закономерностей, связывающих антифрикционные показатели с химическим строением полимеров показывает, что перспективными антифрикционными термопластами являются полимеры, у которых энергия дисперсионного взаимодействия значительно превосходит энергию диполь-дипольного взаимодействия и Н-связей [1]. Такими термопластами являются кристаллические полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полифениленсульфид (ПФС), полиоксадиазол (ПОД). Однако подобные полимеры в ряде случаев не обеспечивают требуемых трибологических и технологических характеристик.

Задача исследования заключалась в создании антифрикционного высокоизносостойкого термостойкого термопласта на основе аморфного полиариленаэфиркетона (ПАЭК).

Объекты исследования. Одним из теплостойких термопластов, обладающих хорошими технологическими параметрами при переработке и термостойкостью 450°C, является аморфный полиариленаэфиркетон (ПАЭК) на основе бисфенола А и 4,4'-дифторбензофенона. В энергии межмолекулярного взаимодействия ПАЭК преобладают слабые дисперсионные силы, что потенциально позволяет создать на основе этого полимера материал с пониженным значением коэффициента трения. С целью повышения роли механической составляющей силы трения была систематически исследована зависимость трибологических свойств ПАЭК от его молекулярной массы (ММ).

Обсуждение результатов. Экспериментальные данные (рис.) позволяют разделить полученную зависимость на три характерные зоны изменения трибологических параметров. В первой зоне, ПАЭК с приведенной вязкостью $\eta_{пр} \sim 0,4—0,5$ дл/г имеют низкий коэффициент трения и высокое значение износа. Вероятно, это связано с ростом ММ при формировании механического сегмента, в результате чего полимер характеризуется низкими физико-механическими показателями. В следующей зоне изменения параметров трения происходит повышение $f_{тр}$ при $\eta_{пр} = 0,75$ дл/г и 1 дл/г. Такое поведение связано, вероятно, с несимбатным изменением составляющих силы трения $F_{мол}$ и $F_{мех}$. Выше $\eta_{пр} \sim 1$ дл/г начинается снижение $f_{тр}$. Здесь, в третьей зоне, наблюдается стабилизация $f_{тр}$ до значения $\sim 0,4$ и минимальный износ у ПАЭК с $\eta_{пр} = 2,49$ дл/г.

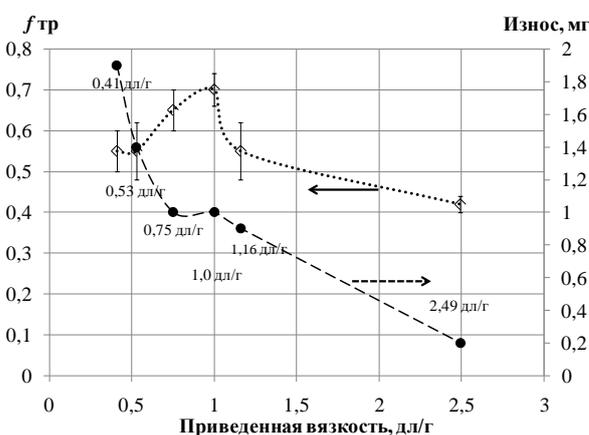


Рис. Влияние молекулярной массы (приведенной вязкости) на коэффициент трения и износ ПАЭК ($P_{тр} = 10$ МПа, $v = 0,5$ м/с)

В отличие от стандартного термопластичного ПАЭК ($\eta_{пр} \sim 0,75$ дл/г), трение которого приводит к закономерному снижению молекулярной массы, продукты износа высокомолекулярного полимера ($\eta_{пр} \sim 2,49$ дл/г) имеют сложный характер молекулярно-массового распределения (ММР). Высокомолекулярный полимер сохраняет помимо низкомолекулярной части значительное количество исходной высокомолекулярной фракции. Вероятно, такое сочетание деструктурированной фракции и сохранившей исходное разветвленное высокомолекулярное строение, обеспечивает комплекс свойств, способствующий созданию износостойкой поверхности с пониженным значением коэффициента трения.

Исследование ПАЭК методом РФЭС показывает, что в случае высокомолекулярного полимера процессы окисления при трении удается локализовать в тончайшем поверхностном слое, что, вероятно, также способствует созданию износостойкой поверхности.

Проведенные **сравнительные трибологические испытания ПАЭК** с промышленными тепло-, термостойкими термопластами, такими как аморфный полисульфон (ПСФ), а также кристаллическими ПЭЭК и ПФС, показывают значительное преимущество аморфного ПАЭК.

1. Буяев Д.И., Краснов А.П., Наумкин А.В., Юдин А.С., Афоничева О.В., Голубь А.С., Горошков М.В., Бузин М.И. Влияние химического строения полиарамидных и полиоксадиазольных волокон на трение органоластов // Трение и износ. — 2016 (37), № 4, 351—357

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 1

Структура и свойства композиционных материалов

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНО-КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КЛИНОПТИЛЛОЛИТА И БЛОК-СОПОЛИМЕРА ПРОПИЛЕНА С ЭТИЛЕНОМ

Н.Т. Кахраманов, Н.Б. Арзуманова

Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; najaf1946@ Rambler.ru

Введение. Как показали результаты проводимых нами исследований, существует ряд уникальных природных минеральных наполнителей, которые способствуют не повышению, а понижению вязкости расплава полимерного композита. В этом случае, представляется возможным осуществлять введение более высоких концентраций наполнителя, при котором вязкость композита всегда будет ниже вязкости исходной полимерной матрицы.

В связи с этим, **целью** данной работы являлось, на примере природного минерального наполнителя и полиолефина показать преимущественные, с реологической точки зрения, особенности нано-композитов, полученные на их основе.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовали блок-сополимер пропилена с этиленом (БЭП) марки **НВ240Р**. В качестве минерального наполнителя использовали **клиноптиллолит (КТЛ)** Айдагского месторождения Азербайджана, типичная оксидная формула которого $(\text{Na}_2\text{K}_2)\text{OAl}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Рентгенфазовый анализ клиноптиллолита показал, что в его состав преимущественно входит: клиноптиллолит — 70—75%, каолинит — 12%, kaoliumspat 3—5% и другие примеси.

Реологические исследования полимерных материалов проводили на приборе MELT FLOW TESTER, CEAST MF50 (*INSTRON, Италия*) в температурном диапазоне 190—250 °С и в интервале нагрузок — 2,16—21,6 кг.

Результаты и обсуждение. Реологические исследования, проводимые в широком диапазоне температур и напряжений сдвига, позволяет несколько глубже взглянуть на процессы, протекающие в расплаве полимера. Особенно это важно, когда речь идет о наполненных полимерных композитах. Изучение этой проблемы приобретает еще большую актуальность, когда рассматриваются полимерные композиты с использованием нано-размерных минеральных наполнителей. По мнению ряда ученых, улучшение свойств композитов определяется тем, что нано-частицы взаимодействуют между собой и с матрицей иначе, чем крупные частицы. Расстояние, на котором происходит это взаимодействие, соизмеримо с размером самих частиц [1].

Было установлено также, что введение **КТЛ** приводит к снижению вязкости нано-композитов на

их основе. Для того, чтобы убедиться в этом были исследованы кривые течения исходного **БЭП** и его нано-наполненных композиций с **КТЛ**, зависимость вязкости расплава от температуры, скорости сдвига и концентрации наполнителя. Из сопоставительного анализа кривых течения было установлено, что введение даже 5 мас.%. **КТЛ** приводит к резкому повышению скорости сдвига в 2,7 раза. При этом, вязкость наполненного композита снижается в 1,7—2,0 раза. Полученные данные, казалось-бы, противоречат общепринятым представлениям о текучести полимерных композитов. Но в процессе анализа состава **КТЛ** было обнаружено, что в нем содержится 12 мас.% каолинита или нано-глины, которая, как известно, характеризуется слоистой структурой [2].

Слоистые структуры, имеющиеся в составе нано-глин, имеют одну характерную особенность, которая заключается в том, что в результате смешения и термомеханического воздействия на расплав полимерного композита происходит интеркаляция макроцепей в межслоевое пространство с последующим распадом слоев, т.е. «экзофолированием» нано-глины на более мелкие частицы. Это обстоятельство, собственно, и предопределяет сравнительно высокую текучесть нано-композитов. Но, мы не исключаем также, что в межслоевом пространстве нано-глины возможно наличие полярных жидкостей (глицерина), обменных катионов или анионов, или поверхностно-активных веществ, которые после распада слоевых структур на более мелкие способны мигрировать в полимерную матрицу в качестве смазки с последующим существенным улучшением скорости течения нано-композитов [3].

Исследования зависимости вязкости от температуры показали, что для исходного **БЭП** кажущаяся энергия активации вязкого течения составляет 41,9—50,3 кДж/моль, а для наполненных композитов изменяется в пределах 52,5—60,0 кДж/моль.

1. Осипчик В.С., Нестеренкова А.И. Талькона-полненные композиции на основе полипропилена. // Пластмассы. — 2007, № 6, 44—46
2. Слепцова С. А., Афанасьева Е. С., Григорьева В. П. Структура и триботехнические свойства политетрафторэтилена, модифицированного слоистыми силикатами // Трение и износ. — 2009, 30, № 6, 587—593
3. URL <http://www.miningenc.ru/m/montmorillonit/>

МНОГОУРОВНЕВЫЙ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

А.Г. Колмаков¹, М.Л. Хейфец², С.А. Клименко³

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия;

²ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

³Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

Введение. Описание структур в материаловедении и трибологии до последнего времени основывалось на их представлении геометрическими объектами с целыми размерностями. Оправданные в ряде случаев такие подходы недостаточны при описании систем со сложной и неоднородной структурой, какими являются нанопроцессы и наноматериалы.

Одним из перспективных путей количественного описания структур материалов и их поверхностей является параметризация, основанная на использовании теории фракталов.

Цель работы — поэтапное на различных структурных и масштабных уровнях материала описание процессов образования поверхностей разделяющих структуры, фазы и слои изделия со сложным микро-, мезо- и макрорельефом.

Фрактальная параметризация и перколяция. Фракталы используются для генерации объектов квазипериодического характера, а их применение позволяет моделировать нерегулярные во времени и пространстве процессы или с хаотическим характером. Теория фракталов хорошо отражает специфику структуры кластеров и перспективна для описания свойств сильно неоднородных материалов.

По своей исходной постановке ей подобна теория перколяции, предназначенная для описания поведения систем вблизи топологических фазовых переходов. Обычно перколяционную модель рассматривают для решеточной системы, в которой выделяют с вероятностью x узлы или связи.

При малой x выделенные узлы в основном изолированы, но с ростом их концентрации появляются кластеры — группы связанных выделенных частиц. При дальнейшем росте x агрегация принимает лавинообразный характер и будет происходить одновременно по нескольким схемам: частица — частица, частица — кластер и кластер — кластер.

Важнейшая характеристика перколяционной системы — порог перколяции, при прохождении через который количество переходит в качество и в системе выделенных узлов связность, вызванная появлением перколяционного гиперкластера, становится глобальной.

Мультифрактальный анализ структур. Самоподобные диссипативные структуры не поддаются простому анализу на основе исследования одного только геометрического самоподобия с использованием величины фрактальной размерности.

Все структуры рассматриваются как потенциально мультифрактальные с той или иной степенью адекватности применения мультифрактального описания.

Основой мультифрактального подхода к количественному описанию структур является построение тем или иным способом меры множества, аппроксимирующей изучаемую структуру. Разбивая на ячейки евклидово пространство, охватывающее изучаемую структуру, можно приписать каждой ячейке свою меру (вес) соответственно природе объекта (доли массы, площади, энергии и др.).

Согласно проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям, для количественной параметризации целесообразно использовать такие мультифрактальные характеристики, как обобщенные энтропии (размерности) Реньи D_q и эффективные количественные характеристики однородности f_q и упорядоченности Δ_q . По изменению этих характеристик можно получать дополнительную информацию о темпах протекания процессов структурообразования, смене механизмов формирования структур и др.

Трансформация фракталов на поверхностях раздела. Анализ фрактальных размерностей при изменении основы и увеличении ее сложности, позволил сформировать основные принципы трансформации фракталов, их перколяции и вырождения при формировании поверхностей раздела структур, фаз и слоев изделия.

Со структурно-энергетических позиций, определена целесообразная последовательность этапов развития поверхностей раздела структур, фаз и слоев: рост фрактальных структур поверхности; увеличение числа элементов основы фрактала; усложнение фрактальных меандров; перколяция слоев на поверхности раздела; вырождение фракталов. При этом смена механизмов трансформации поверхностей раздела в материале *от усложнения фракталов, через их перколяцию к вырождению*, вследствие многомасштабной агрегации, сопровождается на всех этапах как ростом фракталов и увеличением числа элементов основы, так и возможным усложнением фрактальных меандров.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского и Российского фондов фундаментальных исследований (код проекта Т16Р-176).

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ГЛИКОЛЯ И ЕГО СМЕСЕЙ С ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТОМ.

В.Н. Коваль¹, Н.В. Шевлик², С.С. Строгонова³, Л.А. Щербина⁴¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь²ОАО «ГИАП» Могилев, Беларусь³ОАО «Могилевхимволокно», Могилев, Беларусь⁴Могилевский государственный университет продовольствия Могилев, Беларусь²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Сравнительно недавно на рынке полимерных материалов появился новый полиэфир — полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТ-Г), представляющий собой сополимер терефталевой кислоты и этиленгликоля, в котором часть этиленгликоля заменена на циклогександиметанол-1,4 [1]. Данный сополимер не обладает регулярностью структуры и не способен кристаллизоваться [2], вследствие этого может использоваться для изготовления сравнительно толстостенных листовых или блочных изделий с высокой светопрозрачностью. Его практическое применение сдерживается относительно высокой стоимостью.

В докладе представлены результаты исследований особенностей структуры релаксационных, механических и реологических свойств смесей кристаллизующегося ПЭТ и аморфного ПЭТ-Г, содержащих 0,9 мас.% диизоцианатного удлинителя цепи (УЦ).

Материалы и методы. В работе использовали ПЭТ марки 8200 (ОАО «Могилевхимволокно»), ПЭТ-Г, (SK Chemicals Ю. Корея). Смесей получены смешением в расплаве. Испытания при растяжении производили на машине Instron 5657 (Великобритания). Реологическое поведение расплавов оценивали по значениям ПТР и вязкости (η), (прибор 5MPCA «Ray-ran test equipment Ltd», Великобритания). Исследования методом релаксационной спектроскопии (РС) (обратный крутильный маятник конструкции ИММС НАН Беларуси при частоте 1 Гц). Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (микрокалориметр Diamond DSC «Perkin Elmer», США).

Результаты и обсуждение. Исследования показали, что в бинарных смесях ПЭТ/ПЭТ-Г с преобладанием фазы ПЭТ-Г кристаллизация ПЭТ резко замедляется, хотя слабо выраженный пик плавления полиэфира при $\approx 220\text{—}230^\circ\text{C}$ проявляется вплоть до [ПЭТ-Г] = 85%. Важно также отметить, что в смесях с двойной фазовой непрерывностью наблюдается снижение значений $T_{пл}$ ПЭТ по сравнению с исходным полиэфиром. При этом в смесях, содержащих УЦ, это снижение намного существеннее, чем без него и составляет 29°C . Данный факт может быть следствием пластифицирующего влияния аморфного ПЭТ-Г на ПЭТ. Введение добавки УЦ в смеси ПЭТ/ПЭТ-Г приводит к полному подавлению кристаллизации ПЭТ при [ПЭТ-Г] $\geq 70\%$.

По данным РС смеси ПЭТ/ПЭТ-Г независимо от наличия или отсутствия в их составе УЦ имеют единые T_c и T_b , что свидетельствует о совместимости (возможно термодинамической) компонентов. Из данных РС, как и при анализе методом ДСК, следует, что добавки диизоцианатного УЦ способствуют замедлению кристаллизационных процессов в полиэфирных смесях и позволяют получить аморфизированный ПЭТ при [ПЭТ-Г] $\geq 70\%$.

Характерно также (табл. 1), что независимо от типа полиэфирного материала при введении в его состав УЦ существенно повышается деформационная способность, что предопределяет резкое повышение истинной прочности материалов.

Таблица 1. Физико-механические и реологические свойства смесей ПЭТ/ПЭТ-Г

Состав	$\sigma_{тв}$, МПа	$\sigma_{тн}$, МПа	ϵ_p , %	$\sigma_{ри}$, МПа	ПТР, г/10 мин
ПЭТ	$55 \pm 3,1$	23,9	120	55	35,3
ПЭТ-Г	$51 \pm 2,8$	26,9	82	39	9,5*
ПЭТ+50ПЭТ-Г	$56 \pm 3,3$	25,4	63	36	34,2
ПЭТ+50ПЭТ-Г+0,9УЦ	$58 \pm 3,4$	30,6	90	54	12,1
ПЭТ+75ПЭТ-Г	$52 \pm 3,0$	24,7	73	41	35,4
ПЭТ+75ПЭТ-Г+0,9УЦ	$60 \pm 3,2$	29,4	326	124	12,4

Из табл. 1 следует также, что смеси ПЭТ с ПЭТ-Г независимо от их фазовой структуры обладают по сравнению с ПЭТ-Г повышенными значениями верхнего предела текучести, определяющего предельные эксплуатационные нагрузки при растяжении. Добавка УЦ, вводимая в полиэфирные материалы в количестве 0,9%, оказывает сильное влияние на текучесть расплава, снижая значения ПТР примерно в 3 раза. Причинами этого являются повышение молекулярной массы за счет реакций удлинения цепи, а также образование межмолекулярных сшивок при взаимодействии макромолекул, в том числе разнородных полиэфиров с УЦ.

1. Turner S.R., Seymour R.W., and Dombroski J.R. Amorphous and Crystalline Polyesters Based on 1,4-cyclohexanedimethanol // In: Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters / ed. J. Scheirsand, T. E. Long. — John Wiley & Sons, Ltd. — 2003, 267—292
2. Шевлик, Н.В., Строгонова С.С., Тычинская Л.Ю., Коваль В.Н., Щербина Л.А. Синтез и свойства аморфного светопрозрачного с-ПЭТ // Полимерные материалы и технологии. — 2016 (2), № 3, 35—46

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ

В.А. Гольдаде¹, С.В. Зотов¹, В.Д. Борозна², А.Н. Буркин²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

²Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь, wilij@mail.ru

Введение. Искусственные кожи (ИСК) зарубежных производителей на основе полимерных материалов широко применяются в производстве обуви. Выбор ИСК для наружных деталей верха обуви является достаточно сложной задачей, поэтому большое значение имеет исследование физико-механических (в частности, деформационных) свойств этих материалов. Совершенствование методов исследований позволит оценить способность ИСК к формованию, на основе чего сформулировать рекомендации относительно возможностей их использования в реальном производственном процессе.

Результаты и обсуждение. В качестве исследуемых образцов (толщина от 0,5 до 1,9 мм) использовали ИСК: «Эко-кожа», Китай; «Metlack бордо», Германия; «Искож», Беларусь; «Nubuk 376», Турция; «Nubuk 901», Турция.

Методом сканирующей электронной микроскопии срезов установлено, что образцы ИСК имеют многослойную структуру (3—4 слоя, за исключением «Искож»). Верхний полимерный слой выполнен из полиуретана, причем в зависимости от используемых добавок он может быть губчатым, корпунклярным, макропористым, мезопористым или микропористым. Нижние слои выполнены из термоскрепленных полимерных волокон (преимущественно полиэфирных), уложенных в разных направлениях.

ИСК «Metlack бордо» и «Искож» исследовали по показателю проницаемости кислорода и воздуха по ISO 15105-1:2007 с помощью установки GOR-C (Германия) при температуре 23 °С (табл. 1). Образцы демонстрируют разнонаправленность свойств ввиду значительных различий в их структуре.

Таблица 1. Газопроницаемость образцов ИСК

Наименование образца	Газ	Скорость проникновения газа, моль/(м ² ·с·Па)
«Metlack бордо»	Кислород	1170
«Искож»		640
«Metlack бордо»	Воздух	389
«Искож»		239

Исследования физико-механических свойств показали, что диапазон предела прочности образцов

ИСК составляет от 6,0 до 43,3 МПа в продольном и от 8,0 до 48,0 МПа в поперечном направлении деформирования. Во всех случаях исследуемые материалы (кроме «Эко-кожи») соответствуют требованиям стандарта.

Для придания заготовке обуви нужной формы материалы ИСК должны обладать достаточной деформируемостью. Так, при производстве обуви внутреннего способа формования максимальное значение деформации материала, которую он испытывает в районе носочно-пучковой части заготовки верха обуви, составляет около 15%, а при производстве обуви обтяжно-затяжным способом максимальная деформация материала в том же районе составляет 30%. Установлено, что все исследованные ИСК могут быть использованы в заготовках верха обуви внутреннего способа формования, поскольку обладают достаточной деформационной способностью. Однако они не пригодны для формования верха обуви обтяжно-затяжным способом. Среди представленных видов ИСК только «Эко-кожа» отвечает требованиям стандарта при растяжении во всех направлениях при напряжении 10 МПа.

Известно, что чем выше значения условного модуля упругости и жесткости материала, тем меньше его деформация, причем высокая способность сопротивляться растягивающим усилиям означает высокую формуемость данного материала. Исследования показали, что наиболее жесткими являются ИСК «Nubuk-901» и «Metlack бордо» в продольном и в поперечном направлениях растяжения соответственно.

Заключение. По комплексу нормируемых показателей ни один из представленных видов ИСК не соответствует требованиям ГОСТ 939-94 в полной мере. Поэтому требуется тщательный анализ того, какая именно марка ИСК в наибольшей мере пригодна для формования той или иной детали верха обуви, а также какой именно вид обуви (сезонная, детская, облегченная и др.) может быть получен по наиболее технологичному варианту и с наибольшей технико-экономической выгодой. Научно обоснованные ответы на эти вопросы позволят улучшить технологичность и экономичность производства отечественной обувной отрасли.

СТРУКТУРА, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ПЭТ/ПТЭП, МОДИФИЦИРОВАННЫХ В РАСПЛАВЕ УДЛИНИТЕЛЯМИ ЦЕПИ И КОРОТКИМ СТЕКЛОВОЛОКНОМ

В.В. Дубровский, В.В. Шевченко, В.Н. Коваль

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
vlad.dubrovskii@gmail.com

Введение. К числу перспективных материалов относятся композиты на основе ПЭТ, содержащие в качестве армирующего наполнителя короткое стекловолокно (СВ). Это обусловлено потенциальной возможностью создания композитов ПЭТ/СВ конструкционного назначения, не имеющих аналогов по технико-экономическим характеристикам, а также решением проблем, связанных с рециклингом полиэфиров. Негативным следствием деструкции макромолекул, чрезмерного снижения длины армирующих волокон и увеличения дефектности межфазных зон в системе ПЭТ/СВ является недостаточный уровень механических характеристик, и особенно ударной вязкости армированных материалов. Одним из путей решения проблемы повышения ударной вязкости армированных композитов является использование в качестве связующего смесей ПЭТ с полиэфирными термоэластопластами (ПТЭП) [1].

Цель работы — изучение влияния добавок удлинителя цепи (УЦ) на особенности структуры, комплекса реологических и механических характеристик наполненных коротким стекловолокном смесей ПЭТ/ПТЭП с разной фазовой структурой и анализ межфазных явлений в данных материалах.

Материалы и методы. В экспериментах использовали ПЭТ марки 8200 производства ОАО «Могилевхимволокно» (характеристическая вязкость в дихлоруксусной кислоте 0,82 дл/г, температура плавления 255 °С), а также ПТЭП общей структурной формулы $(AB)_n$, где А — жесткий блок из олигомерного полибутилентерефталата, В — мягкий блок политетраметиленоксида с молекулярной массой 2000. В качестве армирующего наполнителя применяли СВ в виде ровинга, выпускаемое ОАО «Полоцк-Стекловолокно» (марка ЕС13-2400Н-54С, диаметр моноволокон 13 мкм). УЦ служил жидкофазный диизоцианатный продукт марки МГТ-Ж (ТУ ВУ40084698.268-2014), представляющий собой смесь дифенилметан-4,4'-диизоцианата с его изомерами и гомологами и добавками стабилизатора.

Композиты получали методом реакционной экструзии при использовании двухшнекового реактора-смесителя с односторонним вращением шнеков ($D = 35$ мм, $L/D = 40$). О молекулярно-структурных изменениях в материалах судили по данным ДСК, РЭМ, релаксационной спектроскопии (РС) и реологического анализа расплавов. Межфазную адгезию в системе полиэфир/СВ оценивали на основании ме-

ханического анализа при растяжении смесевых полиэфирных матриц и стеклоармированных композитов на их основе, а также по данным РС.

Результаты и обсуждение. Введение добавки УЦ независимо от фазовой структуры смеси приводит к росту вязкости расплавов композитов вследствие протекания реакций удлинения цепи и частично межмолекулярного сшивания макроцепей. Когезионно непрочный жидкофазный УЦ оказывает сильное влияние на механические характеристики композитов с разной фазовой структурой, приводя к росту механической прочности при растяжении и изгибе до 1,5 раз, повышению модуля упругости, а также ударной вязкости по Шарпи материалов до 1,6 раз. Причинами, вызывающими проявление данных эффектов являются повышение средней длины СВ в композитах, содержащих УЦ, а также интенсификация межфазного адгезионного взаимодействия в системе полиэфирное связующее — поверхность наполнителя. Рост межфазной адгезии в композитах подтверждается на основании расчетов сдвиговой прочности межфазного контакта по результатам микромеханического анализа образцов, испытанных методом растяжения, а также по данным РС и на основании анализа СЭМ изображений топографии поверхностей разрушения образцов. По данным РС добавка УЦ способствует улучшению совместности компонентов в смесях, что фиксируется по сближению значений T_c ПТЭП и ПЭТ. Введение УЦ приводит к замедлению кристаллизации ПЭТ, регистрируемой по смещению $T_{x_{кр}}$ на 8—10 °С в область низких температур. Однако степень кристалличности ПЭТ в стеклоармированных композитах не только не снижается, но даже несколько возрастает по сравнению с материалами, не содержащими УЦ. Причиной этого может быть активное нуклеирование кристаллизации ПЭТ короткими СВ и замедление роста кристаллов вследствие пространственных ограничений. На основании полученных данных УЦ могут рекомендоваться для применения в реальных технологиях полиэфирных композитов ПЭТ/СВ.

1. Pesetskii S.S., Shevchenko V.V., and Dubrovsky V.V. Reactive Compatibilization in Technology of Poly(alkylene terephthalate) — Based Composites: Polyester Blends, Short Fiber-Filled Materials, and Nanocomposites / In: Multifunctionality of Polymer Composites, editors K. Friedrich and U. Breuer. — Elsevier, Oxford. — 2015, Ch. 9, 302—337

ДСК/ТГ АНАЛИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И НАНОЧАСТИЦ CuO

Л.Ю. Федоров

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; fedorov.krsk@gmail.com

Введение

В настоящее время сфера применения традиционных металлических материалов и сплавов в современных технических системах постоянно сужается. Это связано как с возрастающим уровнем требований к комплексу эксплуатационных характеристик используемых материалов, так и с предельными значениями их физико-химических свойств. Вместе с тем, для расширенного применения новых композиционных материалов необходимы дополнительные исследования, позволяющие определить и систематизировать комплекс практически важных характеристик. Среди них особое место занимают теплофизические характеристики, без которых выполнение теплопрочностного расчета детали и всего изделия представляется затруднительным.

Цель

Целью настоящей работы является исследование теплофизических свойств сверхвысокомолекулярного полимерного композиционного материала допированного наночастицами CuO в зависимости от содержания нанодисперсных добавок.

Материалы и методы

Объектами исследования являются исходный сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и композиционные материалы на его основе, содержащие в качестве наполнителя нанодисперсный порошок CuO , осажденный на поверхности полимера с различным временем экспонирования. В работах [1—3] представлено подробное описание технологии получения нанокompозитов и отражены некоторые свойства.

Синтез наночастиц CuO проводился посредством плазмохимических реакций паровой фазы меди с кислородом в объеме вакуумной камеры. Давление в камере — 60 Па с соотношением плазмообразующего и реакционного газов $\text{Ar/He} = 80/20$, при непрерывном вращении чаши из нержавеющей стали, в которой располагался полимерный порошок. Полимер был распределен монослоем.

Исследование теплофизических характеристик осуществлялось на приборе синхронного термического анализа ТГ-ДТА/ДСК STA 449 Jupiter (NETZSCH). Навеска образцов составляла около 5 мг, скорость нагрева 10 °C/мин в диапазоне 20—600 °C в атмосфере воздуха, поток 50 мл/мин. Использовались корундовые тигли.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены кривые ДСК и ТГ ана-

лиза исходного СВМПЭ и композитов на его основе.

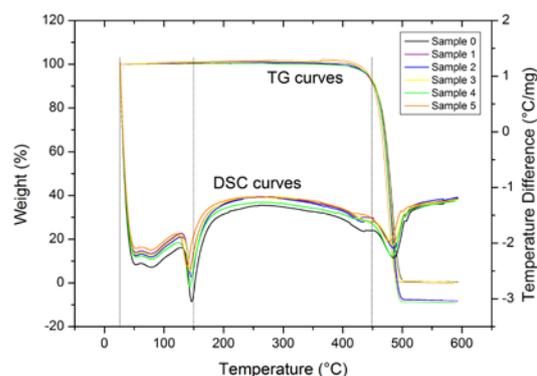


Рис. 1. Результаты дифференциального термического анализа нанокompозитов СВМПЭ/ CuO

В целом характер кривых не претерпевает существенных изменений при добавлении к основной матрице нанодисперсных частиц CuO в различных концентрациях. Выявленный эндотермический пик в области ~147 °C можно отнести к температуре плавления композитов, изменения которой также минимальны, в пределах погрешности измерений. Схожие амплитудные значения и форма кривых позволяют сделать вывод о неизменности структурного состояния композитов и их степени кристалличности. Некоторое смещение кривых ДСК согласуется с ростом содержания наночастиц CuO в композите, очевидно, принимая на себя часть поглощаемого тепла.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-00137 мол. а.

Автор выражает благодарность при выполнении настоящей работы своему научному руководителю — д-ру техн. наук, профессору Лепешеву А.А. и научным консультантам — канд. техн. наук Карпову И.В., канд. техн. наук Ушакову А.В.

1. Карпов И. В., Ушаков А. В., Федоров Л. Ю. и др. Устройство для осаждения наночастиц на полимерные порошковые материалы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2014 (80), № 4, 47—50
2. Ушаков А. В., Карпов И. В., Федоров Л. Ю. и др. Механические и трибологические свойства комплексно-модифицированного материала на основе СВМПЭ и CuO // Трение и износ. — 2014 (35), № 1, 12—17
3. Федоров Л. Ю., Ушаков А. В., Карпов И. В. и др. Теплофизические свойства нанокompозиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и нанопорошка TiO_2 плазмохимического синтеза // Материаловедение. — 2013, № 1, 40—42

НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕТЬЕГО РОДА КАК ФАКТОР СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

А.Г. Анисович

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь; anna-anisovich@yandex.ru

Воздействию холодной плазмы на металлы и сплавы посвящено значительное количество исследований [1—5]. Основными рассматриваемыми проблемами являются подготовка поверхности как металлических, так и неметаллических материалов, изменение механических свойств. Показана возможность изменения твердости и износостойкости гальванических покрытий хрома [6]. Исследования изменения структуры металлов и сплавов под воздействием холодной плазмы воздуха немногочисленны. Причиной тому являются проблемы в интерпретации получаемых результатов; микроструктурные эффекты воздействия незначительны и находятся на грани чувствительности метода. Изменение износостойкости можно связать, в том числе с изменением морфологии поверхности [5]. Есть основание полагать, что в основе изменения свойств при обработке плазмой лежат изменения на уровне кристаллической решетки материала. Информативно в этой связи может дать изучение напряженного состояния, выполненное с помощью рентгеноструктурного анализа.

По методам рентгенографического определения напряжения подразделяются на напряжения 1-го и 2-го и 3-го рода. Первые два имеют энергетический характер, 3-го рода могут иметь как энтропийный, так и энергетический характер. Основная часть энергии остаточных напряжений приходится на искажения кристаллической решетки (напряжения 3-го рода), которые достигают значений порядка 10^{-9} см. Область концентрации таких напряжений достигает нескольких десятых от межатомного расстояния. Искажения 3-го рода охватывают объем в несколько элементарных ячеек. Этим искажениям соответствуют смещения атомов, нарушающие регулярность структуры. Рентгенографически искажения III рода обнаруживаются по ослаблению интенсивности интерференционных линий высших порядков. Смещения атомов, связанные с искажениями III рода, носят статический характер.

Было показано [7], что изменение структуры меди при обработке холодной плазмой воздуха нельзя объяснить изменением напряжений 2-го рода (микронапряжений). Было установлено изменение напряжений 3-го рода, известных как статические смещения атомов из положений равновесия.

Традиционно вопрос о напряжениях 3-го рода разрабатывался применительно к процессам пластической деформации [8]. Изменение интенсивности линий на рентгенограмме может происходить в результате образования текстуры, фрагментации кристаллитов, влияния напряжений 3-го рода. Трудность анализа металлических материалов заключа-

ется в том, что и в процессе деформации, и в процессе последующего отжига изменяется блочная и дислокационная структура, что требует введения поправок на экстинкцию. Экстинкция связана в том числе, и с явлением текстуры. Текстура проявляется в изменении структуры на микроскопическом уровне.

В настоящее время представления о напряжениях 3-го рода используются, в частности, применительно к формированию твердых растворов, влиянию примесей на структуру и свойства материалов, а также фазовых превращений. В данных исследованиях влияние текстуры материалов может не учитываться.

При воздействии плазмы изменения в микроструктуре не наблюдаются [9] ни в изменении размера зерна, ни в изменении фазового состава. Поэтому при исследовании воздействия холодной плазмы на материалы наблюдаемые эффекты следует связывать с изменением статических смещений атомов из положения равновесия. При этом изменение свойств можно объяснено стабилизацией структуры за счет совершенствования кристаллической решетки.

1. Vivet L., Joudrier A.-L., Boutemy M., Vigneron J., Tan K.L., Morelle J.M., Etcheberry A., and Chalumeau L. // *Applied Surface Science*. — 2013 (274), 71—78
2. Brackmann V., Hoffmann V., Kauffmann A., Helth A., Thomas J., Wendrock H., Freudenberg J., Gemming T., and Eckert J. // *Materials Characterization*. — 2014 (91), 76—88
3. Prysiazhnyi V., Stupavská M., Ráhe J., Kleber C., Černák M., and Rafailovi L.D. // *Surface & Coatings Technology*. — 2014 (258), 1082—1089
4. Anisovich A.G., Azharonok V.V., Gologan V.F., Bobanova Zh.I. et al. // *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. — 2016 (2), 42—49
5. Anisovich A.G., Azharonok V.V., Gologan V.F., Tereshko I.V. // 7th Int. Conf. on “Materials science and Condensed Matter Physics”, sept. 16—19, 2014, Chisinau. — 2014, 281
6. Анисович А.Г., Ажаронок В.В., Гологан В.Ф., Кроитор Д.М. Изменение износостойкости гальванических покрытий хрома при обработке холодной плазмой // Тезисы междунар. науч.-техн. конф. «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2015.) Гомель, 23—26 июня 2015 г. — 2015, 180
7. Ажаронок В.В., Анисович А.Г., Басалай А.В., Гончарик С.В. и др. // *Инженерно-физический журнал*. — 2013 (4), 731—738
8. Терминасов Ю.С., Феклисов Г.А. Рентгенографическое исследование механизма термического воздействия на пластически деформированные металлы // *Известия АН СССР, сер. физическая*. — 1956 (20), № 6, 695—699
9. Анисович А.Г., Ажаронок В.В., Басалай А.В., Гончарик С.В., Филатова И.И., Чубрик Н.И. Структурные изменения в медных сплавах под воздействием холодной плазмы воздуха // “Physics and diagnostics of laboratory and astrophysical plasmas” The XI belarusian-serbian symposium Minsk, Belarus, December 2016. — P.34—37. Edited by A.N. Chumakov, M.M. Kuraica, M.S. Usachonok.

МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ПА6, НАПОЛНЕННЫХ КОРОТКИМИ ВОЛОКНАМИ И НАНОЧАСТИЦАМИ

С.П. Богданович, В.В. Дубровский, В.Н. Адериха, С.С. Песецкий

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение

К числу стратегических направлений исследований и технических разработок следует отнести технологию термопластичных конструкционных пластиков, в которых армирующими наполнителями являются одновременно частицы нано- и микромасштабных размеров [1]. Весьма перспективными материалами являются термопласты, наполненные короткими волокнами и слоистыми глинистыми силикатами (СГС). Имеются отдельные работы, в которых отмечается синергическое усиливающее влияние гибридных наполнителей типа короткое стекло- угле- или базальтовое волокно и органомодифицированный СГС [2—4].

Цель работы — анализ влияния рецептурных и технологических факторов на структуру, межфазное взаимодействие, механические, реологические и релаксационные свойства гибридных композитов на основе ПА6, коротких волокон и СГС.

Материалы и методы

В экспериментах применяли полиамид 6 марки 210/310, выпускаемый ОАО «Гродно Азот. Используемый СГС — Na⁺-монтмориллонит, модифицированный обработкой ПАВ (четвертичной аммонийной солью соляной кислоты, в которой катион азота связан с метильным, таллильным и двумя гидроксипропиловыми углеводородными радикалами); торговая марка — Cloisite 30B (С130В), производство ф. Southern Clay Products Inc., США. Применяемые волокнистые наполнители — ровинги из базальтовых комплексных нитей (производитель ООО «Каменный век», РФ) и стеклонитей (ОАО «Гродно Азот»), а также короткие углеволокна (ОАО «Светлогорск Химволокно»). Для интенсификации адгезионного взаимодействия макромолекул ПА6 с поверхностью частиц наполнителей и удлинения цепи в состав композитов вводили жидкофазный модификатор гетероцепных термопластов марки МГТ-Ж (ТУ ВУ 400084698.265-2014), содержащий в своем составе ароматический полиизоцианат.

Компаундирование материалов осуществляли методом реакционной экструзии в расплаве ПА 6 на экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 с однонаправленным вращением шнеков [3]. Исследовали механические свойства композитов, реологическое поведение расплавов, а также структуру по данным широкоугольной рентгенографии (РСА), ДСК, ДМА и СЭМ. Усредненную длину волокон в композитах определяли методом оптической микроскопии с использованием программного обеспечения ImageJ. О межфазной адгезии ПА6 к поверхности волокон судили на основании расчетов межфазной

сдвиговой прочности по данным механического анализа при растяжении исходного ПА6 и наполненных композитов, а также, используя экспериментальные данные, полученные методом ДМА [3].

Результаты и обсуждение

Установлено, что в композитах, содержащих гибридный наполнитель независимо от типа волокон реализуется синергический эффект повышения механической прочности, жесткости и ударной вязкости материалов. Особенно ярко данный эффект проявляется при пониженной ($\approx 15\%$) концентрации волокон в композитах, что, видимо, обусловлено относительно высокой долей связующего, не входящего в состав межфазного слоя с пониженной подвижностью на границе с волокном и потому способного к перестройке морфологии при взаимодействии с органомглиной. Так, например, максимальный прирост значений прочности при изгибе при введении 6% С130В в композиты с 40% и 15% УВ составляет соответственно 106% и 132%, а модуля упругости при растяжении — 109% и 120%. Для высоконаполненных (40%) композитов значения ударной вязкости несколько снижаются по мере повышения концентрации С130В от 0,5% до 6%, а в малонаполненных (15%) УВ материалах наблюдается сильный (до 1,7 раза) рост данного показателя по сравнению с композитом, не содержащим органомглину. В волокнонаполненном ПА6, вопреки ожиданию, добавки органомглины в присутствии изоцианатсодержащего удлинителя цепи по данным ДСК и РСА не только не повышают, но даже несколько снижают кристалличность полимера вследствие стерических затруднений при кристаллизации макромолекул ПА6. В их присутствии происходит увеличение средней длины волокон, а также, по результатам расчетов межфазной сдвиговой прочности и данным ДМА, возрастает межфазная адгезия в системе полимер/гибридный наполнитель, что лежит в основе наблюдаемых эффектов упрочнения.

1. Песецкий С.С. Гибридное микро- и нанонаполнение конструкционных пластиков: синергизм армирующего действия // Полимерные материалы и технологии. — 2015 (1), № 2, 5
2. Pedrazzoli D and Pegoretti A. Silica Nanoparticles as Coupling Agents for Polypropylene/Glass Composites // Comp. Sci. Tech. — 2013 (76), 77—83
3. Песецкий С.С., Богданович С.П., Содылева Т.М., Адериха В.Н., Усова В.Н. Морфология и свойства гибридных композитов ПА6 с короткими углеродными волокнами и органомглиной. // Полимерные материалы и технологии. — 2016 (2), № 3, 47—57
4. Песецкий С.С., Богданович С.П., Содылева Т.М. Упрочнение полиамида 6 при гибридном наполнении коротким базальтовым волокном и наноглиной. // Докл. НАН Беларуси. — 2017 (61), № 1, 105—114

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИЭФИРОВ И УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ИХ ОСНОВЕ

А.И. Буря

Днепропетровский государственный технический университет, Камянское, Украина; ol.burya@gmail.com

В 70-е годы получило заметное развитие новое направление полимерной химии, связанное с созданием жидкокристаллических самоориентирующихся полимеров двух типов: лиотропных, имеющих упорядоченную молекулярную структуру в растворе, и термотропных, обладающих ориентированной структурой в расплаве [1]. Особенно пристальное внимание привлекли к себе термотропные жидкокристаллические полимеры (ЖКП), т.к. их переработка в изделия более технологична [2]. Области применения ЖКП являются бытовая техника (75%), тяжелая промышленность (8%), электроника и электротехника (5%), телекоммуникации (5%), транспортные средства (4%), авиация и космическая техника (3%) другие, включая оборону (2%) [3].

В докладе приводятся сведения о свойствах термотропных ароматических полиэфиров на основе следующих мономеров: ацетилоксибензойная кислота — 60%, диацетилхлоридрохинон — 20%, изофталевая и 2,6-нафталин дикарбоновые кислоты (по 10%) — ЖКП-1 (η — удельная вязкость — 1,2) и диацетатфенилгидрохинон — 45%, терефталевая кислота — 45%, ацетоксибензойная кислота — 10% (ЖКП-2, $\eta = 1,6$ и 7).

Анализ полученных данных (см. табл. 1) позволяет сделать вывод, что увеличение удельной вязкости — η (показатель, характеризующий молекулярную массу полимера) ЖКП-2 в 4,4 раза приводит к повышению износостойкости как при изнашивании о нежесткозакрепленные абразивные частицы (K_{II}), так и по стальному контртелу (I_h) соответственно в 1,2 и 13 раз. Однако коэффициент трения (f) у полимера с более высокой молекулярной массой выше в 2 раза.

Таблица 1. Свойства жидкокристаллических полимеров

Полимер	λ , Вт/м·К	$\sigma_{сж.}$, МПа	HRA	K_{II}	f трения	
					I_h , мг	$P = 0,5$ МПа $V = 1$ м/с
ЖКП-1 $\eta=1,2$	0,28	71,0	94,5	0,38	0,2	0,4
ЖКП-2 $\eta=1,6$ $\eta=7,0$	0,37 0,32	55,7 78,0	130,5 102,5	0,13 0,15	13,2 0,95	0,4 0,8

Примечание. λ — среднее значение теплопроводности в области температур 323—498 К; η — удельная вязкость.

Армирование ЖКП углеродными волокнами (УВ) осуществляли во вращающемся электромагнитном поле по методике [4]. В целом характеризуя свойства углепластиков (УП) следует отметить, что с увеличением содержания УВ с нуля до 40 мас.% повышаются твердость (HRA) на 7,6—14,8%, прочность при сжатии ($\sigma_{сж.}$) на 7,3—37,9%.

Изучение трибологических свойств УП осуществлялось в режиме сухого трения на дисковой машине [5]. Контртело было изготовлено из стали 45 термообработанной до твердости 45—48 HRC (шероховатость поверхности = 0,16—0,32). Износ определяли весовым методом с точностью до 0,1 мг. Температуру в зоне контакта образец—контртело измеряли с помощью термопары зачеканенной в образец на расстоянии 0,3—0,5 мм от поверхности трения. Кузнецов В.Д. полагает, что такие машины могут дать наиболее важные и принципиальные результаты, раскрывающие сущность процессов трения и износа [6]. Влияния содержания УВ на интенсивность линейного изнашивания, коэффициент трения и температуру в зоне контакта свидетельствует о том, что введение углеродного волокна до 20 мас.% обеспечивает наиболее резкое улучшение трибологических характеристик. Дальнейшее повышение содержания волокна изменяет трение и износ УП в данных условиях незначительно. В целом, во всем исследуемом диапазоне для углепластиков наблюдается снижение температуры в зоне контакта на 9—14 градусов, коэффициента трения в 1,3—2,9 раза, износа в 2,8—290 раз.

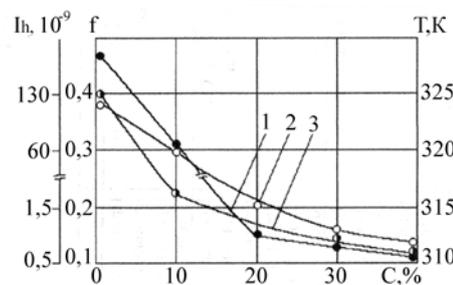


Рис. 1. Влияние содержания углеродного волокна на интенсивность линейного изнашивания (1); коэффициент трения (2); температура в зоне контакта (3) ЖКП-1 давление 2 МПа и скорость скольжения 1 м/с

1. Ryabova T.N., Levit V.G., and Titanova L.N. Liquid crystalline Heat Treated Aromatic Polyesters. — Moscow, NHIEChim, series Production and Processing of Plastics and Synthetic Resins. — 1988, 34
2. Volokhina A.V., Godovskiy Yu.K., Kudryavtsev G.I. at al. Edited by Plate N.A. Liquid Crystalline Polymers. — Moscow, Chemistry Publishing House. — 1988
3. Chem-Techn. — 1987, Bd. 17,4, P. 242—245
4. Фомичев И.А., Бурия А.И., Губенков М.Г. Получение термостойких полимерных материалов в магнитном поле // Журнал “Электронная обработка материалов”, Кишинев: “ШТИИИИЦА”. — 1978, № 4, 26—27
5. Бурия А.И. Трение и изнашивание органоластиков на основе полиамида-6 // Трение и износ. — 1998 (19), № 5, 671—676.
6. Кузнецов, В.Д. Физика твердого тела. — Изд. 2-е, заново перераб. — 1937. — 10, 554 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА БИНАРНОЙ СМЕСИ БЛОК-ПОЛИУРЕТАНОВ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ СВОЙСТВ

В.Н. Анисимов, Н.М. Евдокименко, М.В. Бурмистр

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, Украина; vn7a@mail.ru

Введение

Опыт использования полиуретанов (ПУ) в промышленности диктует необходимость создания композиционных материалов с широким варьированием комплекса эксплуатационных свойств. Перспективным является изучение смесей ПУ при широком варьировании соотношения компонентов, что позволяет существенно изменять уровень деформационно-прочностных свойств, в первую очередь, благодаря образованию межфазной поверхности.

Материалы и методы

Исследованы блок-полиуретаны (БПУ) различного молекулярного строения: из олигомерных эфиров (синтезированы из адипиновой кислоты и гликолей метиленового ряда разной природы — олигоэтилен-гликольадипинат с молекулярной массой ~ 2000 (ОЭГА₂₀₀₀), олигобутиленгликольадипинат с молекулярной массой ~ 500 и ~ 2000 (ОБГА₅₀₀, ОБГА₂₀₀₀), олигоэтиленбутиленгликольадипинат с молекулярной массой ~ 2000 (ОЭБГА₂₀₀₀) а также из простого олигоэфира — олигоокситетраметиленгликоль с молекулярной массой ~ 1000 (ООТМГ₁₀₀₀), синтезированного из тетрагидрофурана. Уретановые группы образовывали из 4,4'-дифенилметандиизоцианата (МДИ). Для получения блочной структуры БПУ вводили низкомолекулярный гликоль — 1,4 бугандиол (бутиленгликоль) (БД). Молекулы исследованных блок-полиуретанов состоят из частей, которые отличаются гибкостью и повторяются. Эластичные блоки образуются из гибких частей (простых и сложных олигогликолей). Жесткие блоки образуются вследствие самоорганизации уретановых групп.

Бинарные смеси из БПУ и промышленные композиты получали механическим смешением исходных полимеров в расплаве на червячно-дисковом экструдере при температуре 140—190 °С и частоте вращения шнека 5—70 об/мин или на термопластавтоматах при давлении 80—100 МПа и температуре 160—210 °С.

Физико-механические, триботехнические и реологические характеристики композиционных материалов определяли по принятым методикам.

Результаты и обсуждение

По результатам анализа взаимосвязи “состав—структура—свойства” установлено, что оптимальный уровень свойств имеют блок-полиуретаны с содержанием жестких блоков (P_c) от 39 до 55%: БПУ ОБГА₅₀₀ (55), БПУ ОЭГА₂₀₀₀ (40), БПУ ОЭБГА₂₀₀₀ (39), БПУ ООТМГ₁₀₀₀ (48) (значения P_c приведены в скобках) и

молекулярной массой со значениями показателя характеристической вязкости $[\eta] = 0,8—1,1$ дл/г (ММ ~ 50000—70000).

Установлено, что молекулярное строение олигомерного блока БПУ существенно влияет на уровень деформационно-прочностных, реологических и триботехнических свойств. Синтез олигоэфира из смеси этиленгликоля и бутиленгликоля приводит к существенному снижению уровня свойств БПУ потенциальной природы: в 4,5 раз уменьшается модуль упругости при растяжении, на 13% уменьшается уровень прочности. Закономерно повышается уровень показателей БПУ кинетической природы: показатель текучести расплава повышается более чем в 2 раза при уменьшении температуры расплава на 25 °С, коэффициент трения увеличивается в 1,5 раза.

Установлено, что уровень свойств смесей превышает уровень свойств индивидуальных полимеров и сохраняется в широком диапазоне концентраций (БПУ ОЭГА₂₀₀₀(40) : БПУ ОЭБГА₂₀₀₀(39) = 80:20÷20:80 мас.%). Характер зависимостей свидетельствует о наличии геометрических фазовых переходов и образовании упорядоченных структур на границе раздела фаз (аналогично феломентарным структурам).

Изучали также свойства полимерных композиций из смеси БПУ, которые отличаются топологической структурой: (БПУ ОБГА₅₀₀(55) — молекулярная масса олигомерного блока ~ 500, БПУ ОЭГА₂₀₀₀(40) и БПУ ОЭБГА₂₀₀₀(39) — молекулярная масса ~ 2000). Для смеси БПУ ОБГА₅₀₀(55) + БПУ ОЭГА₂₀₀₀(40) при соотношении 1:4 величина модуля упругости при растяжении увеличивается в 9 раз. При этом показатели реологических и триботехнических характеристик остаются на удовлетворительном уровне, а значения условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве существенно превышают показатели для резин.

Исследования свойств смесей БПУ на основе сложных олигоэфиров (БПУ ОБГА₅₀₀ (55), БПУ ОЭГА₂₀₀₀ (40), БПУ ОЭБГА₂₀₀₀ (39) с БПУ на основе простого олигогликоля (БПУ ООТМГ₁₀₀₀(48)) также показали рост значений условной прочности и модуля упругости при растяжении с сохранением величины относительного удлинения при разрыве, показателя текучести расплава, интенсивности изнашивания и коэффициента трения на удовлетворительном уровне.

Полученные закономерности позволяют прогнозировать состав бинарной смеси блок-полиуретанов с оптимальным уровнем свойств.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛОКНИСТОГО ГИБРИДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТОВ

А.И. Буря, О.А. Набережная

Днепропетровский государственный технический университет, Камянское, Украина; ol.burya@gmail.com

Введение. Проблема повышения надежности и долговечности машин прежде всего связана с предотвращением изнашивания деталей этих машин, находящихся в подвижном контакте. Одним из путей решения этой проблемы является применение в узлах трения полимерных композиционных материалов (ПКМ). Интенсивный рост нагрузок и скоростей, температуры, усложнение условий эксплуатации подвижных сочленений требуют постоянного улучшения свойств износостойких материалов [1]. Это обуславливает создание новых ПКМ, способных сохранять свои основные свойства в экстремальных условиях работы. К перспективным материалам в этой области относят ПКМ, армированные высокопрочными химическими волокнами.

Цель — разработка и исследование абразивной износостойкости гибридных композитов на основе фенилона, армированных смесью дискретных химических волокон.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовали гибридные ПКМ на основе фенилона С-1 (ТУ 6-05-221-101-71), хаотически армированного смесью дискретных волокон: органического (марки Танлон, длиной 3 мм; модуль упругости при растяжении 7,45 ГПа, относительное удлинение при разрыве 20—25%, плотность 1,42 г/см³) и углеродного (марки Торейка, длиной 3 мм, модуль упругости при растяжении 220—230 ГПа, плотность 1,76—1,80 г/см³). Приготовление композиции определенного состава (табл. 1) подготавливались и осуществлялись методом сухого смешивания во вращающемся электромагнитном поле. Полученные т.о. смеси, таблетировали и перерабатывали в блочные изделия методом компрессионного прессования при температуре [2].

Таблица 1. Состав композиций

Обозначение состава	Содержание волокна, мас.%		Содержание связующего, мас.%	
	Танлон	Торейка	Ароматический полиамид фенилон С-1	
K1	—	—	100	
K2	4	5	91	
K3	5	7	88	
K4	5	15	80	
K5	15	5	80	

Испытания материалов на абразивный износ неподвижно закрепленными абразивными частицами (дисперсность шкурки 40—60 мкм) проводили согласно ГОСТ 11012-69 на испытательной машине Heckert.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов испытаний фенилона и гибридных композитов

на его основе на абразивный износ показало, что данный процесс развивается в две стадии (рис. 1).

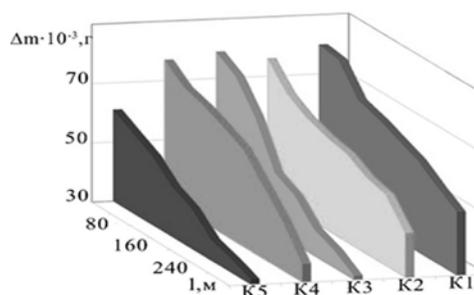


Рис. 1. Зависимость абразивного изнашивания фенилона и гибридных композитов на его основе от пути трения

На первом этапе процесса изнашивания наблюдается значительная потеря массы, на начальных 40—80 м пути (так называемая приработка образца), вследствие увеличения прочности и жесткости поверхности трения композиций. После чего начинается второй этап — характеризующийся практически постоянной и относительно низкой интенсивностью износа, достигая минимальных значений в конце пути трения (320 м) [3]. Износостойкость гибридных композиций K2—K5 превосходит исходный пластик в 1,2—1,7 раза соответственно.

Шероховатость поверхности (Ra) гибридных образцов снизилась в ходе эксперимента по сравнению с исходным фенилоном в 1,3—1,75 раза (табл. 2).

Таблица 2. Шероховатость поверхности трения фенилона и композитов на его основе

Ra, мкм	K1	K2	K3	K4	K5
До износа	0,434	0,433	0,430	0,435	0,436
После износа	0,860	0,680	0,690	0,770	0,760
Δ	0,426	0,247	0,260	0,335	0,324

Таким образом, установлено, что армирование волокнами различной природы способствовало упрочнению поверхностных слоев опытных образцов, что позволяет говорить о повышении долговечности деталей из разработанных композитов в узлах трения в условиях повышенной запыленности.

1. Белый В.А. Проблема создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами // Трение и износ. — 1982 (3), № 3, 389—395
2. Патент Украины № 113813 Износостойкая полимерная композиция / Буря А.И., Набережная О.А., Томина А.-М.В., Козорез В.С. // Бюл. № 5 от 10.03.2017.
3. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трибология. Принципы и приложения — Гомель: ИММС НАНБ. — 2002.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ И ПОЛИМЕРНО-КЕРАМИЧЕСКИХ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

А.М. Валенков¹, В.М. Шаповалов¹, И.И. Злотников²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь; z_ai@tut.by

Введение. Задача разработки черных светопоглощающих покрытий актуальна для современной техники и имеет самые различные области применения — это проблема снижения рассеянного светового фона в оптических приборах и приборах индикации транспортных средств, а также разработка светопоглощающих покрытий для преобразователей солнечной энергии в тепловую. Кроме того оптически черные покрытия — важная часть современных средств отображения информации, в первую очередь различных дисплейных приборов.

Цель — разработка и исследование свойств светопоглощающих покрытий получаемых на поверхности алюминиевых сплавов методом микродугового оксидирования (МДО).

Материалы и методы. Процесс МДО проводили в симметричном анодно-катодном режиме с использованием переменного тока частотой 50 Гц. Покрытия наносили на прямоугольные образцы из алюминиевого сплава марки Д16. Плотность тока поддерживалась равной 5 А/дм², напряжение изменяли в пределах 0...450 В. В качестве базового электролита использовали силикатно-щелочной раствор включающий, г/л: гидроксид калия — 2,0 и силикат натрия — 12, модифицирующей добавкой в электролите служил молибденовоокислый аммоний (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O — 6 [1].

Коэффициент поглощения света полученных покрытий определяли с помощью накладного фотометра модели ФМ-59. Микротвердость покрытий определяли по стандартной методике на приборе ПМТ-3 при нагрузке 2 Н.

Результаты и обсуждение. Введение в электролит ионов молибдена, приводит к тому, что они в процессе МДО внедряются в кристаллическую решетку оксидов алюминия и кремния, изменяя структуру и свойства керамического покрытия, что позволяет получать на алюминии и его сплавах керамические покрытия с выраженным черным цветом и низким коэффициентом отражения видимого света. Окраска оксидно-керамических покрытий в черный цвет согласно проведенным исследованиям обусловлена синтезом в объеме материала покрытия силикатов молибдена переменного состава. Некоторые свойства полученного покрытия приведены в табл. 1, (образец № 1).

Дополнительное улучшение светопоглощающих свойств можно получить нанесением на поверхность полученного керамического покрытия

тонкого слоя оксида меди (CuO). Для этого готовое покрытие пропитывали в водном растворе формиата меди с последующим его разложением при температуре 240...260 °С в атмосфере воздуха. При термическом разложении формиата меди на поверхности керамического покрытия выделяется тонкий слой коллоидных частиц меди, которые вследствие их высокой химической активности и наличия высокой температуры очень быстро окисляются с образованием слоя оксида меди, прочно сцепленного с керамической подложкой. Как показали проведенные исследования, наличие на поверхности покрытия оксида меди увеличивает коэффициент поглощения солнечного света (α_s) и снижает излучательную способность (ϵ_i) поверхности, что в частности повышает КПД преобразования энергии солнечного излучения в тепло в случае применения разработанного покрытия в гелиоустановках (табл. 1, образец № 2). Предположительно этот эффект может быть связан с особыми полупроводниковыми свойствами кристаллического оксида меди.

Таблица 1. Сравнительные свойства покрытий

Показатель	Патент РФ 2459890	Номер образца		
		1	2	3
Коэффициент поглощения света, α_s %	95,8	95,8	96,2	98,4
Микротвердость, ГПа	23,5	24,5	24,0	-

С целью получения светопоглощающих полимерно-керамических покрытий было изучено модифицирующее влияние добавок фторопластовой эмульсии Ф-4Д в электролит для проведения МДО. Эмульсию в количестве 5...10 г/л вводили в электролит на конечной стадии формирования покрытия. В результате этого на поверхности керамического покрытия образуется тонкий слой фторопласта (и низкомолекулярных продуктов его термического разложения микроплазменными разрядами), который как показали исследования, повышает степень селективности (отношение α_s к ϵ_i) получаемых покрытий (табл. 1, образец № 3). Кроме того полимерно-керамические покрытия более устойчивы к воздействию атмосферных факторов.

1. Способ получения светопоглощающего покрытия на поверхности алюминия или его сплавов: пат. 19849 РБ / И.И. Злотников, С.В. Пискунов // Афіцыйны бюл. — 2016, № 1

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТКАНЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ СОЗДАВАЕМЫХ ИЗ НИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; vasilevich@bsu.by

Введение. Прогнозирование физико-механических свойств тканых композитных материалов (КМ) и проектирование тканей под заданные свойства весьма важно для их применения в технике. Сложность объемной структуры плетений и наличие различных иерархических уровней определяет высокую сложность математических моделей и существенную неопределенность, приводящих к накоплению ошибок при переходе с одного уровня на другой.

С другой стороны такая иерархия обеспечивает универсальность процедуры моделирования для всего многообразия тканых структур. Ключ к успеху интегрированного моделирования лежит в объединении механики композитов и текстильного материаловедения.

Варьирование структуры (топологии переплетения) ткани — эффективный путь оптимизации текстильного армирования. Исходными данными для моделирования являются: линейная плотность нитей, их поперечное сечение в свободном состоянии, диаграммы сжатия и изгиба, топология переплетения, плотность ткани. Результатом расчета геометрии нитей является форма нитей и изменение размеров сечения вдоль нитей.

Цель. В настоящей работе не ставится цель конструирования ткани, структура которой предполагается известной. Задача стоит в предсказании предельных деформационных характеристик ткани (препрега) при трансформации с учетом ее реальной начальной структуры.

Материалы и методы. В современном производстве для композиционно-волоконистого материала применяют наполнители, получаемые на основе: 1) пряжей или нитей, изготовленных из волокон, а также ровницы (жгутов), 2) тканей и 3) матов (холстов). В первом случае КМ получается путем послойной укладки семейств однонаправленных нитей. В результате образуется слоистая структура взаимно перпендикулярных семейств нитей, у которых отсутствует взаимное переплетение. Во втором случае рассматриваются ортотропные структуры из композиционных материалов, которые представляют собой многослойные среды на основе тканей, имеющих упорядоченное расположение волокон. Все слои сориентированы в одном направлении. Эта система пропитана полимерным связующим. Необходимо отметить, что тканые материалы создаются из нитей и первоначально обладают высокой гибкостью.

Рассмотренные выше ткани относятся к классу тканей, получаемых путем переплетения семейств нитей между собой в процессе их изготовления. Нити в узлах переплетения не имеют жестких связей. Другая группа тканей выделяется в отдельный класс

ввиду существенного различия в методах их изготовления — мультиаксиальные ткани.

Широко распространенными являются стеклянные и углеродные конструкционные ткани из крученых нитей. Анализ прочностных и деформационных характеристик некоторых видов тканей представлен в данной работе. Основу анализа составляют данные результатов экспериментальных исследований, посвященных определению удлинения при разрыве и величины разрывной нагрузки полоски шириной 25 мм стеклосинтетической, арамидной и др. тканей. Во внимание принималась информация о поверхностной плотности ткани (г/см^2), количестве нитей на 10 см в основе и утке, толщине полоски (мм), марке ткани и нити.

Результаты и обсуждение. Тканые материалы, являющиеся, в основном, двумерными структурами, проявляют хорошую стабильность свойств во взаимно-ортогональных направлениях основы и утка. Кроме того, тканые материалы характеризуются более сбалансированными свойствами в плоскости ткани. Легкость управления свойствами и низкая стоимость изготовления делают стеклоткани и мультиаксиальные ткани привлекательными материалами для конструкционных применений.

На примере стеклопластиков типа СВМ можно устанавливать зависимость упругих характеристик композита от его структуры, определяемой количеством арматуры, уложенной в каждом направлении. Это позволяет за счет изменения вида армирующего материала и схемы его ориентации регулировать анизотропию упругих свойств.

При сравнении стеклопластиков на основе тканей Т-11 заметно влияние типа полимера на значения констант упругости, особенно модулей сдвига.

Содержание наполнителя также является важнейшим фактором, влияющим на прочность и модуль упругости композита. Исходя из того, что основную нагрузку несет арматура, а ее упругопрочностные характеристики почти на полтора порядка выше, чем у матрицы, можно предположить, что увеличение содержания наполнителя вплоть до теоретического предела (90% объемных) будет приводить к росту прочности и жесткости стеклопластика. Однако это не всегда наблюдается на практике.

Существует определенное оптимальное содержание, которое зависит от используемых компонентов, вида деформации, профиля поперечного сечения арматуры, условий эксплуатации и т.д. Армирующему материалу каждого типа соответствует его оптимальное содержание, обеспечивающее максимальную прочность композита.

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С АЗОТСОДЕРЖАЩИМИ АДДУКТАМИ КАНИФОЛИ

К.В. Вишнеvский, Н.Р. Прокопчук

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Введение. Канифоль, ее разнообразные производные (полимеризованная, окисленная, гидрированная, этерифицированная, диспропорционированная, модифицированная канифоль и т.д.) широко применяются в резиновых смесях главным образом как повысители клейкости. Однако для ряда потребителей совершенно неприемлемыми являются такие свойства канифоли, как сравнительно низкая температура размягчения, высокое кислотное число, недостаточная влагуостойчивость, хрупкость, склонность к кристаллизации, способность легко окисляться кислородом воздуха и др. Поэтому канифоль у большинства потребителей используется в виде ее производных, таких как эфиры, амиды, резинаты (соли смоляных кислот канифоли) и др., которые в основном применяются в качестве модифицирующих добавок.

В связи со стабилизацией ассортимента каучуков и основных ингредиентов резиновых смесей для создания резин с новыми свойствами или повышенного качества весьма перспективным является введение в рецептуру специальных технологических добавок, улучшающих и стабилизирующих технологические свойства резиновых смесей, но не влияющих при этом на свойства резиновых изделий.

Цель — установление влияния азотсодержащих аддуктов канифоли на свойства эластомерных композиций, в частности на протекание релаксационных процессов в резиновых смесях.

Материалы и методы. Определению вязкости проводили на сдвиговом дисковом вискозиметре, испытания проводили по ГОСТ 10722-76.

Испытание на релаксацию напряжения проводится на тех же образцах, сразу после завершения измерений вязкости. Так, после испытания образца резиновой смеси $ML(1+4)$ (1 мин предварительного прогрева, 4 мин испытания) в течение 1 мин до конца испытания регистрируются данные по релаксации напряжений. Общее время испытания составляет 6 мин. На основании полученных данных рассчитывался коэффициент релаксации (K_p):

$$K_p = \frac{ML(1+4) - k}{ML(1+4)} \cdot 100\% \quad (1)$$

где k — величина крутящего момента на первой секунде, усл. ед. Муни.

В качестве объектов исследования были выбраны стандартные (по ГОСТ 11138) эластомерные композиции на основе каучука СКМС-30 АРКМ-15, в которые не вводился наполнитель. Исследуемые

добавки вводились дополнительно в количестве 1,5 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука и представляли собой канифольноцитраконовый аддукт (КЦА), с различными продолжительностью и температурой проведения реакции, а также продукты взаимодействия полученных КЦА с анилином (АКЦА). АТЦА — продукт взаимодействия аддукта терпентина, цитраконового ангидрида и анилина. Реакцией КЦА-3 с азотсодержащими соединениями были получены следующие продукты: ОКЦА — с октиламином, ЭКЦА — с этаноламином, ОкКЦА — с н-октадециламином (синтез добавок осуществлялся сотрудниками лаборатории лесохимической и нефтехимической продукции ИХНМ).

Результаты и обсуждение. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Вязкость по Муни и коэффициент релаксации ненаполненных резиновых смесей

Вводимая добавка	$ML(1+4)$	K_p
без добавок	32,0	53,4
КЦА-3	31,7	51,1
КЦА-4	32,3	51,0
КЦА-5	33,0	53,3
КЦА-6	31,8	52,8
АКЦА-3	31,5	52,4
АКЦА-4	32,4	51,5
АКЦА-5	31,8	51,3
АКЦА-6	32,2	52,8
ОКЦА	32,9	53,5
ОкКЦА	31,8	53,1
АТЦА	32,0	51,7
ЭКЦА	31,7	53,3

Из полученных данных видно, что исследуемые добавки практически не оказывают влияния на вязкость по Муни резиновых смесей.

Наибольшие значения K_p имеют смеси с без добавок (53,4%) и содержащие КЦА-5, КЦА-6, ОКЦА, АКЦА-6 и ЭКЦА. Это свидетельствует о хороших совместимости и равномерности распределения данных добавок в объеме эластомерной матрицы. Введение остальных добавок в незначительной степени приводит к замедлению релаксационных процессов, что может быть связано с затруднениями в ориентации макромолекул каучука в следствии введения добавок.

Таким образом, проведенное исследование показало целесообразность введения подобных добавок, повышающих адгезию и аутогезию эластомерных композиций и при этом не влияющих на параметры их переработки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА

С.М. Данилова-Третьяк, Л.Е. Евсеева, С.А. Танаева, К.В. Николаева*

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси; *nikolajewa@hmti.ac.by

Цель — исследовать влияния типа и концентрации наполнителя на тепловое поведение полимерных композитов на основе полиамида.

Материалы и методы. Объектом исследования являются композитные материалы на основе полиамида 6 (ПА-6). В качестве наполнителя использованы углеродные наноматериалы (УНМ) (ИТМО НАН Беларуси) в трех концентрациях 1%, 20%, 50% и наноалюминий (Al) (ИТПМ СО РАН) с концентрацией 10%. Нанокompозиты были изготовлены методом смешения в растворе (толуол) с

наложением ультразвукового поля. Выбранный метод смешения позволяет получать материалы с более равномерным распределением дисперсной фазы.

Тепловое поведение исследовалось на приборе синхронного термического анализа STA-449 F3 Jupiter (NETZSCH) в температурном диапазоне от 23 °С до 500 °С в атмосфере азота. Скорость нагрева 2 К/мин.

На рис. 1 представлены термограммы исследуемых образцов.

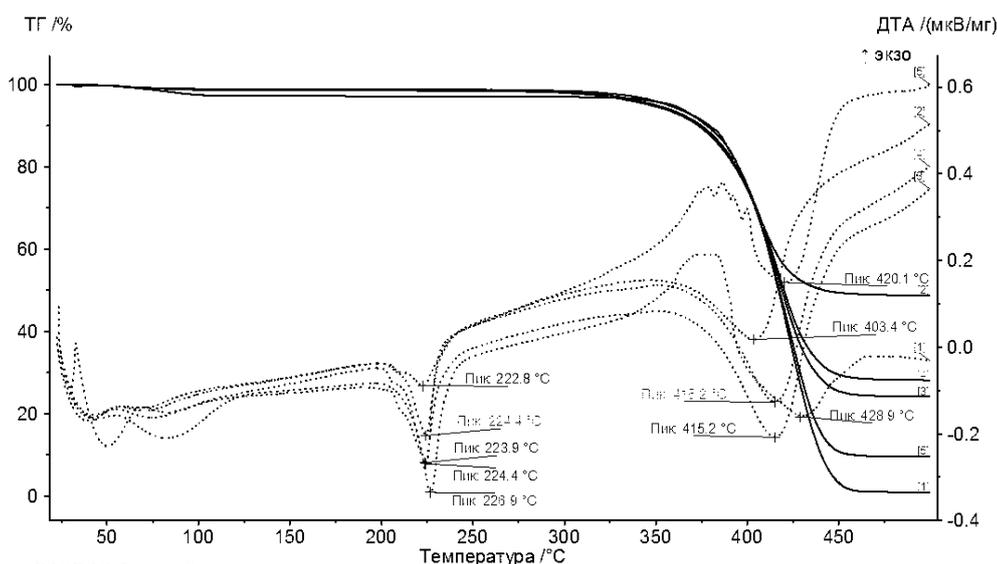


Рис. 1. Термограммы исследуемых образцов. 1 — ПА; 2 — ПА+50%УНМ; 3 — ПА+20%УНМ; 4 — ПА+20%УНМ+10%Ал; 5 — ПА+1%УНМ+10%Ал

Результаты и обсуждение. Из рис.1 видно, что увеличение температуры приводит практически к полной потере массы ненаполненного ПА-6. Потеря массы наполненных образцов соответствует концентрации матрицы. С ростом концентрации наполнителя наблюдается уменьшение температуры плавления. Энергия, затрачиваемая на плавление полимера, уменьшается, наблюдается раздвоение пика плавления, что может свидетельствовать о двух температурах плавления — полимера, который находится в межфазном слое и самого полимера. Из

графика видно, что термодеструкция зависит от состава материала, при увеличении концентрации наполнителя температура начала терморазложения уменьшается. Температура максимальной скорости разложения также смещается на 13—25 °С в более низкотемпературную область.

Таким образом, введение данных наноматериалов не увеличивает термостойкость полиамида и может свидетельствовать о более слабом взаимодействии частиц нанонаполнителя с матрицей ПА-6 и их пластифицирующем воздействии на полимер.

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ НАНО-КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ И КАОЛИНА

Н.Т. Кахраманов¹, Р.В. Курбанова²

¹Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан, najaf1946@gambler.ru

²Азербайджанский Государственный Университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Изменяя состав и структуру полимерной матрицы, по сути дела, представляется возможным в довольно широких пределах регулировать качественные характеристики композитов на их основе. В этой связи, наибольшее распространение получила техника введения силановых аппретов в композиты, предназначенные для целенаправленного улучшения адгезионного взаимодействия на границе раздела полимер — наполнитель. Учитывая сложность механизма взаимодействия аппретов с наполнителем и полимерной матрицей, в литературе изучению этой проблеме уделяется постоянное внимание [1]. Использование наночастиц в полимерных композитах еще более усиливает интерес к использованию аппретов в этом направлении. Ограничены исследования, направленные на изучение влияния аппретов на эффективность действия структурообразователей в наполненных полимерных композитах.

Целью данной работы являлось изучение одновременного влияния аппретов и структурообразователей на основные эксплуатационные свойства полимерных нано-композитов.

В качестве объекта исследования использовали: полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) марки 10604-007, минеральный наполнитель — каолин ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с размером частиц 55—120 нм, аппрет — аминоэтиламинопропилтриметоксисилан $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}-(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ (АЭПМОС), агента смазки стеарат цинка и структурообразователь двуокись титана (TiO_2).

Нами установлено, что введение вышеуказанных компонентов в состав ПЭНП способствует улучшению свойств композитов, за исключением относительного удлинения. Так, например, по мере увеличения концентрации аппрета в составе ПЭНП максимальное значение разрушающего напряжения и прочности на изгиб достигается при его содержании, равном 1,0 мас.%. Далее при исследовании раздельного влияния каолина на ПЭНП был достигнут ожидаемый результат с максимумом разрушающего напряжения при 5,0 мас.% его содержании. Дело в том, что каолин плохо смачивается с макроцепями ПЭНП, что, в конечном счете, проявляется в значительном снижении относительного удлинения и разрушающего напряжения, в особенности при его больших концентрациях в полимерной матрице. Характерно при этом, что прочность на изгиб непре-

ривно увеличивается с ростом концентрации наночастиц каолина в составе композита. Все это объясняется различием в механизме разрушения композитов при одноосном растяжении и при изгибе. Иными словами, снижение относительного удлинения и прочности при растяжении наполненных композитов, по-видимому, можно интерпретировать только тем, что в процессе охлаждения, кристаллизации и роста сферолитов большая часть наполнителя скапливается в аморфной области, которая, как известно, состоит из большого числа «проходных цепей», предопределяющих механизм образования «шейки» при одноосном растяжении. И по мере увеличения доли частиц наполнителя в межсферолитном пространстве, проходные цепи становятся, как-бы «замурованными» в аморфном пространстве. В результате чего конформационная подвижность макроцепей ухудшается, что несомненным образом сказывается на затруднении процесса одноосного растяжения образцов и ухудшении разрушающего напряжения композитов [2].

Исследовано совместное и раздельное влияния ингредиентов — TiO_2 и стеарата цинка на измененные физико-механических характеристик наполненных композитов. Сопоставительный анализ данных показал, что с увеличением концентрации вышеуказанных ингредиентов в составе композитов на основе аппретированного каолина наблюдается заметное улучшение их физико-механических свойств. Предназначение структурообразователя — TiO_2 в составе композита заключается в формировании дополнительных гетерогенных центров кристаллизации, которые, как известно, способствуют формированию мелкосферолитной структуры. Мы не исключаем и тот факт, что наночастицы каолина и частицы стеарата цинка также могут одновременно участвовать в формировании гетерогенных центров кристаллизации. В данном случае синергический эффект проявляется в улучшении физико-механических характеристик рассматриваемых полимерных композитов.

1. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы. — Изд-во Томского политехнического университета. — 2013
2. Кахраманов Н.Т., Юзбашева Л.Н. Исследование процесса кристаллизации модифицированных полиолефинов // «Ученые Записки». Национальная Авиаци. Академия. — 2009 (11). № 4, 16—21

ВЛИЯНИЕ ЦИНКОСОДЕРЖАЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

С.Н. Каюшников¹, Н.Р. Прокопчук², Е.П. Усс²

¹ОАО «Белшина», Бобруйск, Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; uss@belstu.by

Введение. Применение цинкосодержащих технологических добавок в составе шинных эластомерных композиций является одним из перспективных направлений улучшения качества готового изделия. Технологически активные добавки (ТАД) играют существенную роль не только в процессах смешения и переработки резиновых смесей, и их вулканизации, что позволяет целенаправленно регулировать технологические свойства резиновых смесей без ухудшения технических свойств резин. При этом характер изменения свойств эластомерных композиций при использовании ТАД зависит от количественного и качественного содержания цинка и природы соединений, входящих в состав добавки. Большая часть технологически активных добавок изготавливается на основе нефтехимического сырья, что обуславливает их высокую стоимость, затрудняет широкое внедрение в производство. Поэтому все большее внимание уделяется получению технологических добавок на основе растительного происхождения [1, 2]. В настоящее время в Республике Беларусь ТАД закупаются за рубежом ввиду отсутствия собственного производства. В связи с этим разработка эластомерных композиций с применением цинкосодержащих добавок отечественного производства является актуальным направлением научно-исследовательских работ.

Цель работы. Исследование влияния природы и дозировки цинкосодержащих добавок отечественного производства при частичной замене оксида цинка и стеариновой кислоты на технические свойства наполненных эластомерных композиций.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись наполненные шинные эластомерные композиции на основе каучука СКИ-3.

Исследуемые цинкосодержащие добавки СЦС₁, СЦС₂, СЦС₃ представляют собой смесь цинковых солей жирных кислот, синтезированных с использованием различного сырья. Наличие в составе данных добавок солей цинка и жирных кислот позволяет уменьшить в составе резиновых смесей содержание оксида цинка и стеариновой кислоты. В связи с этим резиновые смеси вводили комбинации оксида цинка с различными цинкосодержащими добавками в соотношениях 4:1; 3:1; 2:1 и 1:1 при содержании 1,0 и 0,5 мас. ч. стеариновой кислоты, т.е. осуществляли снижение содержания кислоты на 50%. Общая дозировка технологических добавок составляла 4,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука.

Определение условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве, а также обработку результатов испытаний проводили в соответствии с ГОСТ 270–75. Стойкость резин к тепловому старению определяли при температуре $(100 \pm 2)^\circ\text{C}$ после (72 ± 1) ч старения по ГОСТ 9.024–74.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования установлено, что частичная замена оксида цинка на цинкосодержащие технологические добавки оказывает незначительное влияние на прочностные свойства резин на основе СКИ-3. Показатель условной прочности при растяжении для резины с оксидом цинка составляет 18,7 МПа, а для резин с технологическими добавками находится в пределах от 19,1 до 19,9 МПа. Выявлено, что с увеличением содержания исследуемых ТАД в эластомерной композиции показатель условной прочности при растяжении несколько уменьшается. Так, для резин с добавкой СЦС₃ показатель условной прочности при растяжении изменяется с 19,7 до 19,1. Определено, что эластические свойства резин с исследуемыми компонентами также не претерпевают значительных изменений в случае частичной замены оксида цинка на ТАД. Аналогичные зависимости изменения упруго-прочностных свойств выявлены и для резин с уменьшенной дозировкой стеариновой кислоты.

Результаты исследования теплостойкости резин показали, что частичная замена оксида цинка на СЦС₁ во всех исследуемых соотношениях не обеспечивает получение вулканизатов стойких к воздействию повышенной температуры. В тоже время резины с СЦС₂ в комбинации с оксидом цинка во всех исследуемых соотношениях и с СЦС₃ в комбинации с оксидом цинка в соотношениях 4:1 и 3:1 характеризуются повышенной стойкостью к тепловому старению в воздушной среде, что, вероятно, обусловлено особенностями структуры вулканизационной сетки резин с данными добавками. В случае резин с уменьшенной дозировкой стеариновой кислоты (0,5 мас.ч.) выявлен аналогичный характер изменения свойств резин после теплового старения в воздушной среде.

1. Карманова О. В. Технологические активные добавки на основе сопутствующих продуктов производства растительного масла // Каучук и резина. — 2009, № 5, 18–21
2. Ушмарин Н. Ф. и др. Трихлорэтилфосфат — новый пластификатор резиновых смесей // Каучук и резина. — 1995, № 5, 32

НАНОКОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРНОГО ПОЛИУРЕТАНА

М.А. Ксенофонов, Л.Е. Островская, В.С. Васильева

НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь, lab_dozator@mail.ru

Введение. Низкая электропроводность полимерных материалов способствует накоплению на их поверхности статического электричества, что повышает риск возникновения пожаров и может быть причиной нарушения работы электронного оборудования.

Цель — исследование влияния нанонаполнителей на структуру, механические и электрофизические свойства полиуретанового композита.

Материалы и методы. Разработана технология *IN SITU* синтеза эластомерного полиуретанового композита. В качестве наполнителей использовали шунгит и смеси шунгит+таунит-МД. Для дезинтеграции нанотрубок и равномерного распределения их в полимере использовали как хлористый метилен при концентрации таунит-МД (0,06÷0,5) мас.%, так и шунгит при концентрации таунит-МД (0,5÷1,0) мас.%.

Шунгит (производитель ТОО “ГРК “Коксу”, Казахстан) природный минерал, состоящий и смеси углеродных нанотрубок и фуллеренов при содержании до 90% частиц с размером < 20 мкм. Таунит-МД (производитель ООО “НаноТехЦентр”, Тамбов) многослойные углеродные нанотрубки: наружный диаметр 30—80 нм, длина более 20 мкм.

Для выяснения влияния наполнителей на структуру полиуретана исследованы спектры ИК (Фурье-спектрофотометр Bruker-Vertex-70) и спектры фотолюминесценции на установке Cary Eclipse (Agilent) с ФЭУ R3896 при возбуждении 280 нм. Электрофизические свойства композитов исследовали на электрометре Keithley 6517В с приставкой для измерения сопротивления пластин диэлектриков (Model 8009 Resistivity Test Chamber) при напряжениях 100, 200 и 1000 В.

Результаты и обсуждение. Анализ спектров показал, что присутствие наполнителей на стадии формирования полимерной матрицы сказывается на изменении межмолекулярных и межфазных взаимодействий в полиуретане [1], и соответственно на изменении электропроводности и механических свойств. Так для образцов композита, у которых наблюдается сдвиг основной полосы полиуретана от 386 нм к 334 нм и появляется новая полоса при 644 нм (рис. 1), характерно повышение электропроводности в 10^5 раз (рис. 2) и увеличение твердости по Шору на 20 отн.ед. Установлено: увеличение приложенного напряжения в 10 раз практически не влияет на электропроводность композита (рис. 2, А); концентрационная зависимость электропроводности композита носит пороговый характер; электропро-

водность увеличивается на 5 порядков в интервале концентрации наполнителя (таунит-МД + шунгит) $\approx 0,06\div 5,83$ мас.%; увеличение концентрации шунгита выше 10% (в смесях с таунитом) сопровождается снижением электропроводности композита (рис. 2, Б) вплоть до значений характерных для исходного полиуретана.

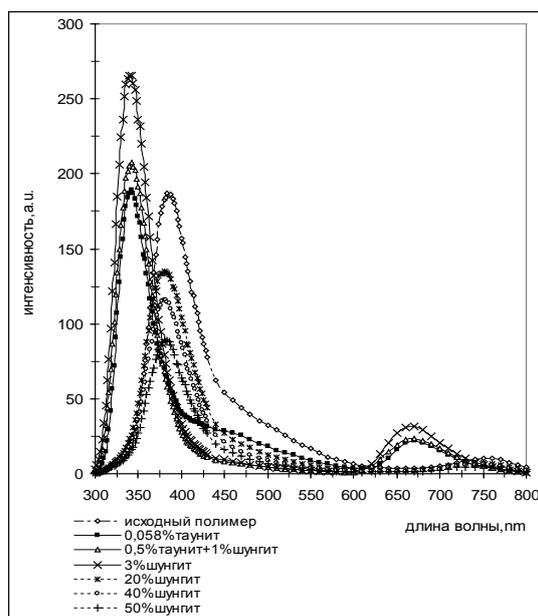


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции полиуретановых композитов

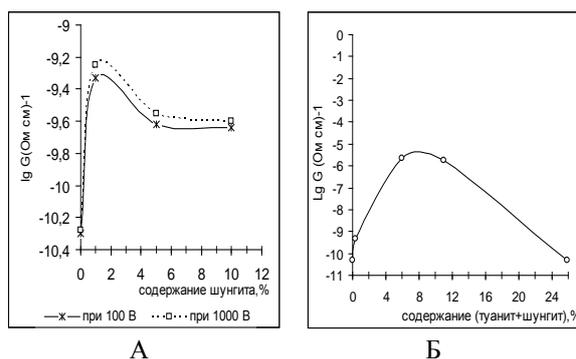


Рис. 2. Влияние концентрации наполнителя на электропроводность композита

1. Ксенофонов М.А., Островская Л.Е., Бобкова Е.Ю., Васильева В.С., Павлюкевич Т.Г. Межфазные взаимодействия пенополиуретановых систем с неорганическими наполнителями // Полимерные материалы и технологии. — 2016 (2), № 2, 49—53

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Al–Si–N

Т.А. Кузнецова¹, Т.И. Зубарь¹, В.А. Лапицкая¹, В.В. Углов²,
Н.Т. Квасов², В.И. Шиманский², С.А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; kuzn06@mail.ru

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Наноконпозиционное строение покрытий, при котором нанокристаллы нитридов внедрены в аморфную матрицу, является одним из современных подходов к повышению механической прочности защитных нитридных покрытий. Для наноконпозиционных материалов с большой удельной долей границ зерен на первый план выходит их термостойкость [1]. При термических воздействиях в неравновесных нанокристаллических материалах имеют место процессы, связанные с аморфизацией, фазовыми переходами [1]. Это приводит к эволюции структуры и изменению ее свойств [2]. Отсюда исследование стабильности микротвердости нанокристаллических покрытий под действием температуры является исключительно актуальной задачей.

Для определения физико-механических свойств пленок субмикронных толщин успешно применяются зондовые методы индентирования [3, 4]. Среди них для твердых защитных покрытий наиболее эффективным является метод наноиндентирования (НИ) с записью непрерывной кривой значений приложенной нагрузки от глубины внедрения [5].

Целью данной работы являлось определение микротвердости наноконпозиционных пленок системы Al–Si–N толщиной 300 нм в исходном состоянии и после вакуумного отжига при температурах 600, 800 и 900 °С.

Материалы и методы

Исследуемые образцы Al–Si–N наноконпозиционных покрытий с содержанием Si 6 и 30 ат.% и толщиной около 300 нм были сформированы магнетронным распылением мишеней Al и Si на кремниевые подложки.

Измерения микротвердости проводились на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (США) путем внедрения алмазного индентора Берковича с радиусом закругления острия 100 нм в поверхность пленок с непрерывной регистрацией зависимости глубины внедрения от приложенной нагрузки. Для каждой пленки было выполнено по 25 измерений при нагрузках 500, 1000 и 1500 мкН.

Результаты и обсуждение

Значения микротвердости, полученные для пленок Al–Si–N с 6 и 30 ат.% Si в исходном состоянии при различных нагрузках, показали, что для них характерны более низкие значения на поверхности пленки, чем в более глубоких слоях (рис. 1). После воздействия температур эта тенденция сохраняется.

Значения микротвердости аморфных пленок в исходном состоянии и после отжига при температурах 600 и 900 °С практически совпадают при всех глубинах внедрения.

Получены зависимости микротвердости нанокристаллической и аморфной пленок Al–Si–N от глубины внедрения при температурах отжига. Снижение значений микротвердости после вакуумного отжига при температуре 900 °С у кристаллических пленок с 6 ат.% Si от 25,2 ГПа на 17,5% и у аморфных пленок с 30 ат.% Si от 21,0 ГПа на 2,7% свидетельствуют о термической стабильности сформированных структур.

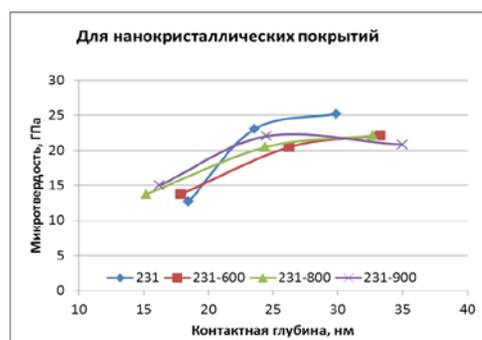


Рис. 1. Зависимости микротвердости от глубины индентирования для нанокристаллической пленки Al–Si–N в исходном состоянии и после отжига

- Углов В.В. и др. Радиационная и термическая стабильность структурно-фазового состояния покрытий на основе системы Al–Si–N // Тез. 46 Тулиновской конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. 31 мая — 2 июня 2016 г, Москва. — 2016, 132
- Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Чижик С.А., Углов В.В., Квасов Н.Т., Шиманский В.И. Изменение морфологии поверхности нанокристаллических пленок Al–Si–N под действием отжига // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. XII Междунар. конф., Минск, 18–21 окт. 2016 г. — Минск: Белорусская наука. — 2016, 66–70
- Chizhik S.A., Rymuza Z., Chikunov V.V., Jarzabek D., and Kuznetsova T. Micro- and Nanoscale Testing of Tribomechanical Properties of Surfaces / in Recent Advances in Mechatronics / Ed.: R. Jabłoński, et al. — Berlin: Springer. — 2007, 541–545
- Погоцкая И.В., Кузнецова Т.А., Чижик С.А. Определение модуля упругости нанопокрытий методом атомно-силовой микроскопии // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011, № 3 (16), 43–48
- Warcholinski B., Gilewicz A., Kuznetsova T.A., Zubar T.I., Chizhik S.A., Abetkovskaia S.O., and Lapitskaya V.A. Mechanical Properties of Mo(C)N Coatings Deposited Using Cathodic Arc Evaporation // Surface & Coatings Technology. — 2017 (319), 117–128

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Н.И. Курбанова, Н.А. Алимierzоева, А.М. Кулиев, Ф.С. Гулиева

Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; ipoma@science.az

Одним из наиболее перспективных направлений развития современной науки является нанотехнология — получение и использование материалов, имеющих в составе наночастицы. Развитие науки о наноразмерных и кластерных металлосодержащих частицах в матрицах полимеров стимулируется постоянно растущим интересом к данной проблеме во многих областях химии, физики и материаловедения. Развитию таких исследований во многом способствовало создание металлополимерных композиционных материалов, обладающих специфическими физико-механическими и эксплуатационными свойствами: повышенной тепло- и электропроводностью, высокой магнитной восприимчивостью, способностью экранировать ионизирующее излучение [1].

Ранее нами были получены новые нанокompозитные термопластичные эластомеры (ТПЭ) на основе ПП/СКЭПТ с применением нанонаполнителя (НН), содержащего наночастицы (НЧ) оксида меди, обладающие улучшенными прочностными и реологическими показателями, высокой термоокислительной стабильностью [2].

В представленной работе исследованы свойства смесевых ТПЭ и динамически вулканизированных (ТПВ) на основе ПП/СКЭПТ с применением НН, содержащих НЧ оксидов металлов (Cu, Ni), стабилизированных на полимерных матрицах полиэтилена (НЧCuПЭ), (НЧNiПЭ) и акрилонитрилбутадиенового термопласта (НЧCuАБС). Соотношение исходных компонентов (мас.ч.): ПП/СКЭПТ/НН = 50/50/1.

Полимерные композиты получены путем смешения в скоростном смесителе закрытого типа «Брабендер» при $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости вращения ротора 100 об/мин в течение 10 мин, а вулканизированные — методом динамической вулканизации в тех же условиях с применением серосодержащей вулканизирующей системы.

Получены новые нанокompозиты на основе ПП/СКЭПТ с применением НЧ оксидов меди и никеля. Проведены исследования физико-механических, реологических, электрических свойств, а также РФА-анализ полученных нанокompозитов.

Показано, что в смесевых ТПЭ применение НН приводит к некоторому уменьшению модуля упругости при некотором сохранении прочностных показателей системы, однако, способствует увеличению показателя ПТР при нагрузке 10,6 кг в 1,22 раз. Применение НН в вулканизированных композициях — ТПВ приводит к уменьшению величины модуля упругости E в 1,3 раза при сохранении предела прочности на разрыв и относительного удлинения. При этом система не течет при нагрузках в 2,16 и

5,0 кг, а увеличение нагрузки до 10,6 кг приводит к появлению течения смеси (в случае НЧCuПЭ), что очень важно для процесса переработки системы.

Уменьшение модуля упругости композита, вероятно, обусловлено агрегацией НЧ, приводящей к формированию микродефектов в объеме полимерной матрицы. Появление течения композита, по-видимому, связано с увеличением подвижности сегментов полимера при взаимодействии НЧ с матрицей на наноразмере. Как показали результаты проведенных исследований физико-механические показатели системы ПП/СКЭПТ с участием НН, содержащих (НЧCuПЭ) и (НЧNiПЭ), выше по сравнению с показателями для НН с (НЧCuАБС). По-видимому, здесь имеет значение не только влияние НН, содержащих различные НЧ оксидов металлов, но и вопрос совместимости полимерных матриц, на которых стабилизированы эти НЧ, с исходной исследуемой системой ПП/СКЭПТ, т.к. одинаковые НЧ оксида меди, стабилизированные на разных матрицах ПЭ и АБС, показывают различные значения физико-механических свойств.

Показано, что полученные нанокompозитные ТПЭ на основе ПП/СКЭПТ с применением НН, содержащего НЧ оксидов меди и никеля, обладают улучшенными реологическими показателями с сохранением предела прочности на разрыв и относительного удлинения при некотором уменьшении величины модуля упругости. Применение НН в вулканизированных композициях — ТПВ приводит к появлению течения смеси в случае применения НЧCuПЭ

Дифрактограммы РФА подтверждают наличие наночастиц оксидов металлов в ТПЭ.

Показано, что малая добавка НН в количестве 1 мас.ч. практически не влияет на кристалличность и диэлектрическую проницаемость ТПЭ и ТПВ. Полученные данные электрических свойств ТПЭ соответствуют показателям обычных диэлектриков. Введение НН различной природы уменьшает модуль упругости исследованных ТПЭ и ТПВ. Размер НЧ существенно влияет на механические показатели материалов.

Авторы выражают благодарность д.х.н. проф. Прут Э.В. за помощь при получении и исследовании свойств нанокompозитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при президенте Азербайджанской Республики — Грант № EIF-Mob-1-2013-1(7)-16/13/4.

1. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. — М.: Химия. — 2000
2. Kurbanova N.I., Alimirzoeva N.A., Kuliev A.M., et. al. // European Applied Sciences. — 2014, № 4, 100—103

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 2

Трибология

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF A PURELY NATURAL COMPOSITE: BLACK-FIBER PALM WOOD

Klaus Friedrich¹, Emmanuel I. Akpan², and Bernd Wetzel³

^{1,2,3} Institute for Composite Materials (IVW GmbH), Technical University Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany; friedrich@ivw.uni-kl.de

Introduction. Wood (being a natural composite) can be an excellent material for applications in which friction and wear are critical issues. Wooden bearings (often lubricated with oil or grease) were used in the past in many applications such as grain mills, construction cranes, and military machines [1, 2]. But wood was also used as a material for brakes since it possesses under dry conditions a high friction coefficient against metal surfaces. Good examples are wooden brake shoes used in traditional coaches.

In the present study, the material under consideration was black-fiber palm wood. Its black fibers (which are actually vascular bundles (VB)) that give the wood its characteristic look and hardness, are embedded in a lighter tan or light brown colored matrix, called ground tissue [3—4]. It was the objective to study the wood's wear properties against different counterparts.

Experimental. The black-fiber palm wood had a macroscopic density of 865 kg/m³. The abrasion behavior of the wood was investigated by means of a custom-built scratch machine against an abrasive paper SiC P180 (average abrasive grain size ca. 160 μm). Sliding wear tests were carried out with a self-built pin-on-disc device against a polished 100 Cr6 steel disc with an initial surface roughness of 220 nm, using a contact pressure of 0,5 MPa and a sliding velocity of 1 m/s.

Results. Fig. 1 illustrates the internal structure of the black fiber palm wood. The diameters of the individual black fibers (vascular bundles) are different in size (between 1 and 1.6 mm). It is known that the tension strength of palm wood is dominated by the strength and share of the VB.

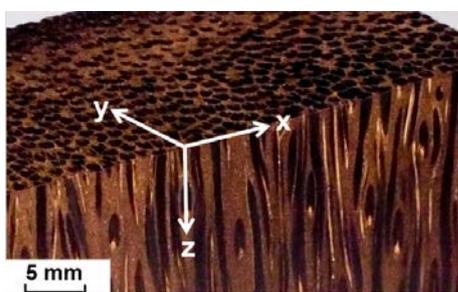


Fig. 1. Quasi-unidirectional structure of vascular bundles in a black-fiber palm wood, with major orientation in the z-direction.

The specific wear rate w_s vs. the black fiber orientation for two-body abrasive wear tests is presented in Fig. 2. Wear rates under scratching of the grains with fibers in plane (anti-parallel and parallel) are higher than that of scratching with fibers normal to the contact region.

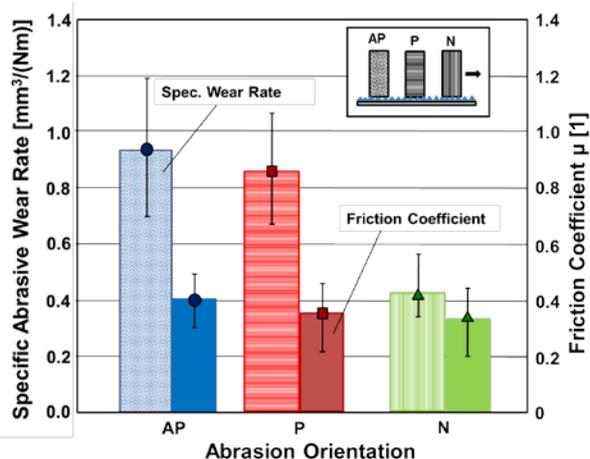


Fig. 2. Specific abrasive wear rate as a function of abrasion orientation: N-orientation = abrasion on the x-y-plane (Fig. 1), i.e. fiber ends are normal to the surface of the abrasion paper; P-orientation = abrasion on the x-z-plane in z direction, i.e. fibers are in plane and parallel to the scratch direction; AP-orientation = abrasion on the x-z-plane in x direction, i.e. fibers are in plane and anti-parallel (transvers).

Opposite to the abrasion data, the sliding wear rates showed a clear dominance in wear resistance of the parallel and normal vs. the anti-parallel orientation (Fig. 3). Though the coefficients of friction were on a similar, high level (ca. 0.6), the wear rates in P- and N-orientation were half that of the AP-orientation.

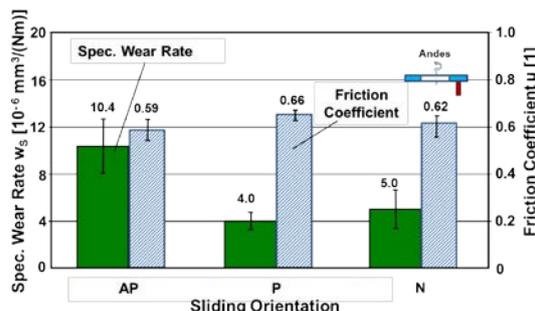


Fig. 3. Relation between specific sliding wear rate (based on weight reduction), friction coefficient, and sliding orientation of a black-fiber palm wood pin against a 100Cr6 steel disc surface.

- Sathre R. and Gorman T.M. Improving the Performance of Wooden Journal Bearings // *Forest Products Journal*. — 2005 (55), no. 11, 41—47
- Steurnagle J.R. Wood Bearings in the New Millennium, Woodex Bearing Co. // *Plant Services*. — 2005, no. 469, Jan 03
- Gibson L.J. The Hierarchical Structure and Mechanics of Plant Materials // *J. R. Soc. Interface*. — 2012 (9), 2746—2766
- Fathi L. and Frühwald A. The Role of Vascular Bundles on the Mechanical Properties of Coconut Palm Wood // *Wood Material Science & Engineering*. — 2014 (9), no. 4, 214—223

TRIBOLOGICAL BEHAVIOURS OF BALL-SCREW IN HEAVY DUTY INJECTION MOLDING MACHINE

J.H. Horng¹, Y.Y. Chen², and C.C. Yu¹

¹Department of Power Mechanical Engineering, National Formosa University, Yunlin, Taiwan; jhhorng@gmail.com

²Department of Systems and Naval Mechatronics Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

Abstracts. How to save energy and improve the service life of the extreme-pressure ball screw to replace conventional hydraulic system is very important factor in heavy duty injection molding machine. The study goal is to make the existing heavy-duty ball screw friction reduced by more than 15 percent, saving energy 15%, improve the fatigue resistance of 30% through material engineering, screw transmission mechanism, contact mechanics, lubricant, friction, wear and diagnose technology. The tribological work shows that the contact load ratio of bodies and friction coefficient of the packing stage is larger than the injection stage for injection axis ball screw under the extreme-pressure operating conditions. Therefore, there are more opportunities for wear and failure with the screw running in the packing stage. The friction force of the injection stage is larger than the packing stage, so that will cause more energy consumption in the injection stage. The friction coefficient increases with increasing particle diameter and particle density at various groove factors. A new design ball screw has been manufactured and tested.

Introduction. Ball screw is composed of screw, nut, ball and reflux mechanism that it makes the rotation into the linear motion by rolling friction is the key element in the international community which already has a leading position. However, in the occasion of extreme transmission ($P = 1.8 \sim 2.0$ GPa), such as all-electric injection molding machines, forging equipment, blow mold machines, jacks, gates gate thrust mechanism, heavy load actuator and various types of hydraulic equipment and other occasions. The operation condition and function requirements have greatly difference in ball screw with the general use of the machine tool. Heavy duty load is applied on an extremely pressure ball-screw. Contact stress thus is large at ball and race-way contact area. Plastic deformation, friction and wear problems are become seriously than precision positioning ball-screw. In our work, the force equilibrium equation was described as follows:

$$F_{total} = \frac{\pi H_{s1} H_{s2}^2 \eta_a A_n}{H_{s1} + H_{s2}} \left[\frac{9\pi^2}{4} \left(\frac{H_{s1}^2}{E_{as1}^2} + \frac{H_{s2}^2}{E_{s1s2}^2} \right) \int_{d-h_t}^d x_a \varphi_a(x_a) dx + \int_d^{x_{max}} x_a \varphi_a(x) dx \right] + \left(1 - \frac{\pi H_{s1}^2 \eta_a}{H_{s1} + H_{s2}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} x_a \varphi_a(x_a) dx \right) F_{s1s2}$$

Discussions

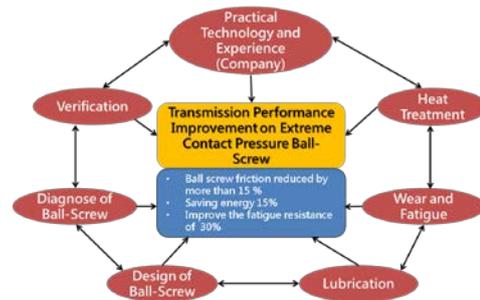


Fig. 1 Research on transmission performance improvement on extreme contact pressure ball-screw.

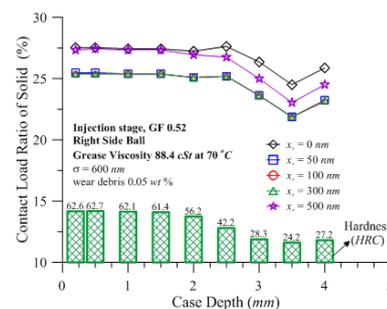


Fig. 2 Contact load ratio of solid vs. case depth at various particle diameters.

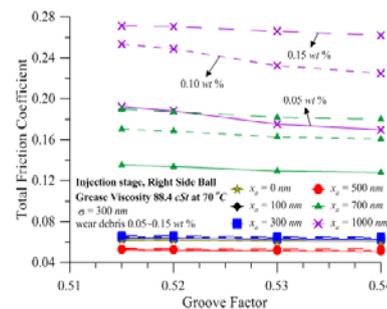


Fig. 3 The friction coefficient vs. groove factor at various particle diameters.

Acknowledgements The authors acknowledge the Ministry of Science and Technology, R.O.C., for supporting this research under Grant MOST 106-2622-E-150-001-CC2 and HIWIN Technologies Corp.

1. Horng J.H., Wei C.C., and Tsai H.J. A Study of Surface Friction and Particle Friction between Rough Surfaces // *Wear.* — 2009 (267), 1257—1263.
2. Wu H.W., Chen Y.Y., and Horng J.H. Contact Temperature under Three-Body Dry Friction Conditions // *Wear.* — 2015 (330—331), 85—92

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Е.В. Торская¹, А.Н. Любичева¹, М.А. Ляховецкий², Ю.В. Корнев³

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

²Московский авиационный институт, Москва, Россия

³Институт прикладной механики, Москва, Россия

Сравнение покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования (МДО) на алюминиевых авиационных сплавах, по сравнению с другими методами обработки, и в частности, с широко распространённым в авиационно-космическом производстве анодированием, показывает, что МДО покрытия обладают лучшими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. При этом технология МДО пока не нашла широкого применения в авиастроении, что объясняется тем, что недостаточно изучены процессы, особенности и условия изнашивания и разрушения МДО покрытий в таких условиях эксплуатации, которые характеризуются высокими удельными контактными давлениями, низкими скоростями скольжения (до 1 м/с) и вибрациями с частотой до 60 Гц при амплитудах до 0,005 мм, что приводит к схватыванию при вибрационном трении.

Цель — теоретико-экспериментальное исследование механизмов и закономерностей изнашивания и разрушения композиционных керамических покрытий, полученных методом МДО, в условиях эксперимента, моделирующего вибрационную нагрузку в реальных узлах трения, в том числе с малыми и сверхмалыми амплитудами.

Механические свойства покрытий определялись по результатам индентирования (комплекс NanoTest 600). Обработка результатов индентирования проводилась с учетом упругой деформации подложки [1, 2]. Было получено значение модуля упругости покрытия 220 ГПа.

Образцы покрытия толщиной 70 и 100 мкм исследовались при следующих условиях эксперимента, исключающих фрикционный разогрев и возникновение зон сцепления:

Контакт — схема сфера/плоскость (сфера — технический алмаз с диаметром 3,7 мм);

Толщина покрытия — 50 мкм;

Нормальная сила в контакте 200 Н;

Перемещение трущихся тел 6—500 мкм с частотой $f = 20$ Гц;

Коэффициент трения менее 0,03

Проводилось экспериментальное исследование влияния толщины покрытия и амплитуды возвратно-поступательного движения на механизмы разрушения покрытий. Для исследуемых условий нагружения проводился расчет напряженного состояния в

покрытии и подложке. Было установлено, что при малых амплитудах не происходит разрушения покрытия, при увеличении амплитуды происходит образование поверхностных трещин, что может быть связано с ростом амплитуды растягивающих напряжений. При исследуемых условиях нагружения в материале подложки образуется обширная зона пластической деформации (рис. 1). При больших значениях амплитуды за счет упрочнения-разупрочнения материала на границах этой зоны происходит зарождение трещины на границе раздела покрытия с подложкой (механизм малоциклового усталости), что приводит к выкрашиванию покрытия (рис. 2).

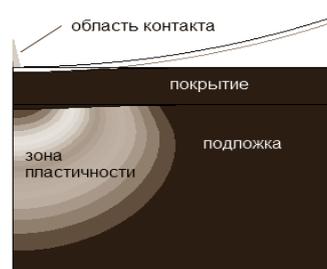


Рис. 1. Деформация покрытия и зона пластичности при нагрузке 200 Н

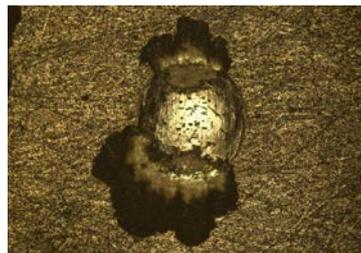


Рис. 2. Выкрашивание покрытия при амплитуде 200 мкм

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-08-00749).

1. Горячева И.Г., Мышкин Н.К., Торская Е.В., Корнев Ю.В., Гуцев Д.М., Кудрицкий В.Г. Моделирование фрикционного взаимодействия композиционных покрытий триботехнического назначения // Трение и износ. — 2012 (33), № 6, 557—565
2. Torskaya E.V. and Goryacheva I.G. The Effect of Interface Imperfection and External Loading on the Axisymmetric Contact with a Coated Solid // Wear. — 2003 (254), № 5—6, 538—545

СЦЕПЛЕНИЕ КОЛЕСО—РЕЛЬС ПРИ ПОДАЧЕ В ОБЛАСТЬ КОНТАКТА ЧАСТИЦ ОКАЛИНЫ ИЛИ МАГНЕТИТА

И.И. Соснов¹, Ю.Ю. Осенин¹, Ю.И. Осенин¹, А.В. Чесноков², О.В. Сергиенко³

¹Бердянский университет менеджмента и бизнеса, Бердянск, Украина

²Технологический университет, Королев, Россия; es_ut@bk.ru

³Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Северодонецк, Украина

Введение

Реализация больших тяговых и тормозных усилий, при движении локомотива, требует высокого уровня сцепления колес с рельсами. В настоящее время это достигается исключительно за счет подачи в область контакта колес с рельсами кварцевого песка.

Однако широкое применение песка стало причиной появлению ряда проблем, имеющих, прежде всего, технико-экономическое и экологическое значение. Следствием этого являются, как прямые экономические затраты, так и чисто экологические потери [1–3].

Исходя из вышесказанного, актуальной является задача поиска альтернативных песку абразивных материалов и разработка условий их применения на подвижном составе железнодорожного транспорта, удовлетворение которым обеспечивает высокие сцепные качества колес локомотива с рельсами при условии минимизации негативных последствий этого процесса.

Цель работы

Сравнительная оценка влияния окалины, магнетита и кварцевого песка на коэффициент сцепления и интенсивность изнашивания поверхностей колеса и рельса.

Материалы и методы

Выбор альтернативных кварцевому песку абразивных сыпучих материалов производился с учетом следующих критериев: твердость; сыпучесть; доступность; трудоемкость исходной подготовки; влияние на экологию.

В соответствии с данными критериями предпочтение было отдано следующим материалам: кварцевый песок (SiO_2 , твердость ~ 7 по шкале Мооса); металлическая окалина (FeOFe_2O_3 , твердость ~ 6,5 по шкале Мооса); оксид железа — магнетит (FeFe_2O_4 , твердость ~ 5,5...6,0 по шкале Мооса). Металлическая окалина (далее окалина) является отходом металлургического и кузнечного производства. Оксид железа (далее магнетит) имеет природное происхождение [4, 5]. Кварцевый песок был принят за базу сравнения, при проведении экспериментов.

Экспериментальные исследования по опреде-

лению влияния интегральных свойств окалины, магнетита и кварцевого песка на коэффициент сцепления колеса с рельсом выполнены на натурной стендовой установке, основой которой является натуральное железнодорожное колесо диаметром 1050 мм и отрезок натурального рельса [6]. Исследование влияния кварцевого песка, окалины и магнетита на интенсивность изнашивания выполнено на модернизированной машине СМЦ-2, трибологической основой которой являются два цилиндрических ролика одинакового диаметра и ширины, изготовленных из рельсовой и бандажной сталей, имеющих возможность нормального нагружения и вращения с заданным проскальзыванием.

Результаты и обсуждение

Выполненное исследование позволило подтвердить эффективность окалины и магнетита в отношении повышения коэффициента сцепления колеса с рельсом. При этом окалина в среднем на 9%, а магнетит на 18% уступает кварцевому песку по данному критерию, однако вызывают меньший износ контактирующих поверхностей (при прочих равных условиях), что дает основания рекомендовать их в качестве альтернативы кварцевому песку в целях повышения коэффициента сцепления колес с рельсами.

Наличие магнитных свойств у окалины и магнетита создают дополнительные конструкторско-технологические возможности создания новых устройств для улучшения сцепления колес и рельсов.

1. Gfatter Günther, Berger Peter, Krause Georg u.a. Handbuch — Grundlagen der Bremstechnik. Handbook — Basics of Brake Technology. Hrsg.: Knorr-Bremse, Systeme für Schienenfahrzeuge. Aufl. — München: Knorr-Bremse. — 2003
2. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами: монография. — М.: Маршрут. — 2005
3. Тяговые расчеты: монография / В.А. Анисимов, В.В. Анисимов. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. — 2013
4. ГОСТ 2787–75. Металлы черные вторичные. Общие технические условия [Текст]. — Введ: 01.01.1977. — М.: Изд-во стандартов. — 1975.
5. ГОСТ 16589–86. Руды железные типа железистых кварцитов. Метод определения железа магнетита [Текст]. — Введ: 01.01.1988. — М.: Изд-во стандартов. — 1987.
6. Осенин Ю.И., Марченко Д.Н., Шведчикова И.А. Фрикционное взаимодействие колеса с рельсом. — Луганск: Изд-во ВУГУ. — 1997

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАЗОРЕ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

В.Д. Тютюма

Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь; tvd@hmti.ac.by

Введение. Теория смазки подшипников скольжения обычно рассматривается как чисто гидродинамическая задача движения изотермической жидкости [1, 2]. При этом несущая способность нагруженных валов связывается с так называемым «клиновидным эффектом» от эксцентричного расположения вращающегося шипа в подшипнике. Однако, существует целый ряд явлений, которые не укладываются в обычные представления, основанные на выводах гидродинамической теории. Так, при изучении поведения смазки в торцевых подшипниках был обнаружен центростремительный эффект, который заключается в возникновении избыточного давления в слое жидкости или газа между вращающимся и неподвижным параллельными соосными дисками [3, 4]. В данной работе показано, что эффект повышения давления свойствен не только торцевым, но и цилиндрическим подшипникам скольжения. Дается теоретическое обоснование возможности возникновения таких гидродинамических явлений. Приводятся результаты экспериментальной проверки теоретических выводов.

Теоретическая часть. До настоящего времени, несмотря на достаточно обширный экспериментальный материал, удовлетворительное теоретическое объяснение центростремительного эффекта отсутствует. Многие исследователи этого явления [3, 4] пытались объяснить его на основе новых реологических законов трения. Рассматривались также новые кинетические подходы к развитию гидродинамических процессов, проявляющихся в условиях больших сдвиговых скоростей вязкостного трения [5]. Однако рассматриваемые теории плохо согласуются не только количественно, но и качественно с результатами экспериментов.

Автором высказана гипотеза, что с увеличением напряжения сдвига в потоке начинает превалировать фононный механизм передачи возмущений, который феноменологически проявляется в виде изэнтропического процесса переноса импульса [6]. Решение на основе видоизмененной системы уравнений движения для распределения давления в щелевом зазоре цилиндрического подшипника с учетом тепла диссипации дает выражение

$$p(\phi) = (p_0 + P_e) \left(1 + \frac{4k\mu b^2}{\lambda r_1^2 r_2^2 T_0} \left(\frac{r_1^2 r_2^2 \Omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \frac{z}{b} \left(1 - \frac{z}{b} \right) \right)$$

$$P_e = \frac{6\mu\Omega_1 r_1^2}{\varepsilon\gamma(1-\lambda\cos\phi)} \left(S_2(\phi, \lambda) - \frac{2(1-\lambda^2)}{2+\lambda^2} S_3(\phi, \lambda) \right).$$

Полученное решение показывает, что на распределение давления в зазоре подшипника ощутимое воздействие должны оказывать диссипативные процессы, связанные с преобразованием механической энергии в тепло. Повышение температуры за счет тепла диссипации механической энергии приводит к повышению давления в центральной зоне подшипника и смещению распределения давления от «клиновидного эффекта» в зону положительных значений.

Результаты экспериментальных исследований. Для проверки теоретических выводов были проведены экспериментальные исследования распределения давления в щелевом зазоре между коаксиальными цилиндрами. Описание установки и первые результаты экспериментов изложены в работах [7, 8]. Полученные экспериментальные данные по распределению давления не только качественно, но и количественно подтвердили выводы теории. В настоящей работе приводятся результаты дополнительных экспериментов, в которых были измерены поля давления в щелевом зазоре не только для коаксиально установленных цилиндров, но и при эксцентричном их расположении в зависимости от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра. Результаты представлены в виде графиков изменения давления в щелевом зазоре в различных меридиональных и поперечных сечениях цилиндрической поверхности. Полученные экспериментальные данные убедительно демонстрируют влияние тепла диссипации на формирование полей давления в сдвиговых потоках между вращающимися цилиндрами. Проводится анализ особенностей проявления термодинамических процессов в таких течениях вязкой среды.

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука. — 1970
2. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. — М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы. — 1955
3. Рейнер М. Реология. — М.: Наука. — 1965
4. Reiner M. The Centripetal-Pump Effect in Air // Proc. Roy. Soc. — 1957 (A 240), 173—188
5. Бубнов В.А. Об эффекте Рейнера // Инженерно-физический журнал. — 1976.(30), № 1, 104—108
6. Тютюма В.Д. Концептуальные особенности построения теории вязких течений сжимаемых сред // Инженерно-физический журнал. — 2012 (85), № 2, 333—335
7. Тютюма В. Д. Экспериментальное подтверждение модели локально-неравновесного течения вязкой жидкости // Докл. НАН Беларуси. — 2014 (58), № 6, 107—111
8. Тютюма В.Д. Распределение давления в кольцевом зазоре между вращающимися соосными цилиндрами при больших напряжениях сдвига // Инженерно-физический журнал. — 2015 (88), № 6, 1476—1479

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИХ СТУПЕНЕЙ УЭЦН

Н.И. Смирнов, А.Н. Яговкина

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; annyagovkina1@gmail.com

Введение. В процессе эксплуатации погружных центробежных насосов (УЭЦН) в пластовой жидкости с повышенным содержанием абразива происходит изнашивание проточной части рабочих ступеней, приводящее к отказу оборудования [1]. Рабочие ступени изготавливают из серого чугуна, высоколегированного чугуна (нирезиста), полимеров и порошковых материалов. Оптимальный подбор материалов по износостойкости способствует минимизации эксплуатационных затрат.

Цель работы. Исследование механизма разрушения, определение эрозионной стойкости материалов рабочих ступеней в абразивосодержащей среде.

Материалы и методы. Образцы для испытаний представляют собой пластинки из четырех видов порошковых материалов на основе железа, пропитанных медью, легированных в зависимости от состава Ni, Cr, Mo и другими элементами; нирезиста; серого чугуна и жидкокристаллического полимера (ЖКТ). В качестве абразива использовали кварцевый песок и корунд различной дисперсности.

Испытания на эрозионное изнашивание проводили на установке, разработанной в ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова [2], рис. 1.

Результаты и обсуждение. В испытательной камере 1, которая закрывается прозрачной крышкой 6, происходит вращение вала 2 с ротором 3. Жидкость из смесителя с абразивом под действием центробежных сил ускоряется в каналах ротора и воздействует через сопла 4 под определенным углом на образцы 5, производя эрозионное разрушение их поверхности. Уплотнения 7 предотвращают протекание жидкости в местах контакта с вращающимся ротором.

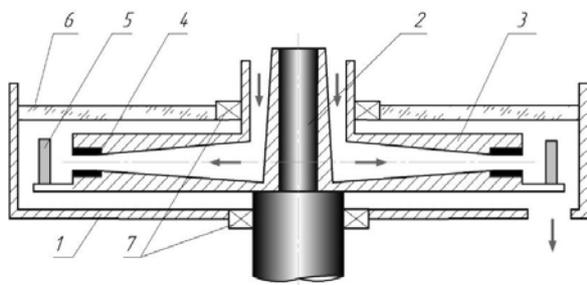


Рис. 1. Схема испытательной камеры установки

Критерием износостойкости материалов является интенсивность изнашивания I_z , равная отношению изменения массы образца к массе использованного абразива.

Параметры опыта: угол атаки 90° , 45° ; скорость потока 11, 16 м/с, комнатная температура.

Измеряли гранулометрический состав абразива, исследовали структуру материалов до и после испытаний, определяли их износостойкость и снимали профили изношенных поверхностей.

Структура исследованных порошковых материалов либо феррито-перлитная, либо перлитная. Перлит в структуре сталей оказывает положительное влияние на их сопротивление эрозии.

Исследование изношенной поверхности на СЭМ показало, что механизм эрозионного разрушения обусловлен пластическим передерформированием поверхности материала, накоплением усталостных повреждений и микрорезанием.

Значения интенсивности изнашивания, полученные после проведения экспериментов, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты опытов

Материал	Абразив — кварц	
	$I_z \cdot 10^6$, г/г (скорость струи 16 м/с)	
	Угол атаки — 45°	Угол атаки — 90°
ПК70Д15	1,9...2,2	1,9...2,2
ПК90Н4МГ2КД15	0,44...0,68	0,92...1,22
ПК10Х16Н9Д20	1,1...1,5	1,8...2,0
ПК10Х7Н4Д20	1,5...1,6	2,1...2,2
Серый чугун	3,8	7,2...7,7
нирезист	2,3...2,4	2,4...2,6

Установлено, что тип абразива влияет на износ материалов. Например, интенсивность изнашивания материалов в воде с корундом F100 ~ в 5 раз выше, чем в воде с кварцем. Износ материала увеличивается при увеличении размера частиц абразива. Наибольшей износостойкостью в заданных условиях опыта обладает порошковый материал ПК90Н4МГ2КД15.

- Смирнов Н.И. Применение расчетно-экспериментальных методов повышения ресурса УЭЦН // Инженерная практика. — 2011, № 2, 6—13
- Патент РФ №2444719, 2012. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н. Способ испытания материалов на гидроабразивный и коррозионный износ

ТРИБОЛОГИЯ ЛИНЕЙНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Н.И. Смирнов, А.Ю. Албагачиев, М.В. Прожега, Н.Н. Смирнов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; prmaksim@gmail.com

Введение. Работа посвящена исследованию процессов трения, происходящих в линейных механизмах (далее ЛМ). Исследованы особенности работы ЛМ, проанализированы условия контакта в различных конструктивных вариантах исполнения. В работе представлен анализ современных методик модельных испытаний трибосопряжений, работающих в ЛМ, предложена собственная методика испытаний.

На сегодняшний день достаточно широко развиты методы расчета кинематики ЛМ. В то время как исследование трибологических особенностей работы ЛМ носит фрагментарный характер. Это обусловлено различием в условиях контакта деталей исполнительного механизма, разными требованиями к ресурсу и условиям работы (атмосфера, вакуум), сложностью проведения ресурсных натурных испытаний. В настоящей работе сделана попытка обобщить имеющиеся результаты исследований применительно к ЛМ, сравнить их трибологические особенности и предложить схему модельных испытаний для оценки ресурса ЛМ.

Цель исследований. Работа направлена на решение проблемы выбора линейного механизма при известной кинематике с учетом трибологических особенностей.

Методы решения задачи. Для сравнительного анализа выбраны 4 типа линейных механизмов: планетарная роликовая винтовая передача (далее ПРВМ), шариковая винтовая передача (ШВП), несоосная винтовая передача (НВП) и волновая зубчатая передача (ВРП). На основе анализа литературы выделены основные виды движения в контакте, табл. 1.

Таблица 1. Типы относительного перемещения деталей трибосопряжений в ЛМ

Тип механизма	Качение	Скольжение	Верчение
ПРВМ	Основной тип	+	+
ШВП	Основной тип	+	+
НВП	Основной тип	+	
ВРП	+		

Считается, что ресурс ЛМ определяется износом трибосопряжений, а их работоспособность лимитируется величиной момента трения. Натурные испытания линейного механизма на ресурс представляет собой трудную задачу, поскольку могут занять большое время, а форсирование (увеличение скорости движения и нагрузки) могут привести к

изменению механизма разрушения поверхности. В качестве примера ресурсных испытаний ЛМ можно привести испытания смазочных материалов на натуральных механизмах из работы [1]. В ней представлены результаты испытаний роликово-винтового механизма платформы для позиционирования двигателя спутника ARTEMIS. Момент сопротивления от трения в испытательном узле авторы оценивали лишь косвенно — по потребляемому току двигателя.

Результаты и их обсуждение. Для оценки смазочных свойств пластичных материалов для линейных механизмов был разработан испытательный стенд, в котором в качестве объекта испытаний используется ролик- или шарикоподшипник. Результаты ресурсных испытаний пластичных смазок на различной базе представлены на рис. 1.

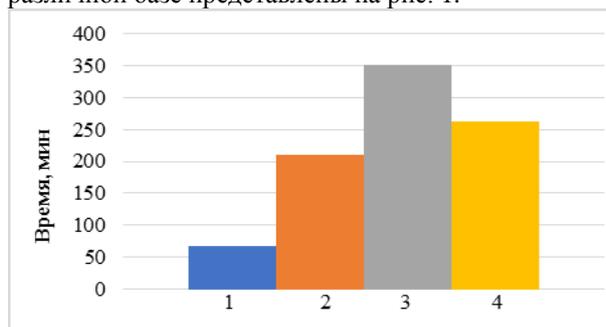


Рис. 1. Результаты испытаний пластичных смазок на ресурс (1 — пластичная смазка на основе кремнийорганики, 2, 3, 4 — на базе ПЭФ с различными загустителями)

Предлагается модель трибосопряжения в виде двух перекрещивающихся цилиндров, из которых один совершает возвратно-поступательное движение, второй катится по первому. Микроскольжение обеспечивается установкой цилиндров по отношению друг к другу не под 90°. Эквивалентные напряжения в контакте достигаются изготовлением цилиндров с эквивалентными радиусами. Рассматривается трибосопряжение винт-ролик, как наиболее нагруженное. За время опыта происходит срабатывание определенного количества смазочного материала, нанесенного на поверхность в зоне трения.

- Falkner M., Nitschko T., Supper L., Traxler G., Zemann J., and Roberts E. Roller Screw Lifetime under Oscillatory Motion: From Dry to Liquid Lubrication // 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATS), San Sebastian, Spain, Sept. 24—26, pp. 297—301

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИЕМ В СИСТЕМЕ КОЛЕСО—РЕЛЬС

С.М. Захаров¹, А.П. Краснов², М.В. Горошков², И.Г. Горячева³

¹Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Москва, Россия;
smzakharov@yandex.ru

²Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия,

³Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Введение. Управление трением в системе «колесо—рельс» основано на создании на поверхностях, где происходит контакт колес с рельсами, слоев (модификаторов трения), обладающих заданными характеристиками трения. Сформулированы требования к характеристикам модификаторов трения [1].

Моделирование действия модификатора в системе колесо—рельс. Методами механики контактного взаимодействия определены распределения нормальных и касательных напряжений и соотношение зон сцепления и проскальзывания в области контактного взаимодействия колеса и рельса с учетом реологических свойств наносимых на поверхность колеса полимерных слоев, а также распределение продольной и поперечной компоненты проскальзывания. Сделана оценка теплового состояния в области контакта.

Выбор и оценка свойств полимерных композиций. В ИНЭОС РАН разработаны суспензионные модификаторы трения на основе различных водо-, спирторастворимых полимерных связующих и минеральных наполнителей, которые технологически устойчивы и не седиментируют в течение длительного времени. Лабораторная технология нанесения наполненных суспензий на сталь позволяет получить покрытия толщиной 5—10 мкм с требуемыми фрикционными свойствами. Исследованы различные составы и отработана лабораторная технология получения модификаторов трения, а также методики определения дисперсности и распределения наполнителя в тонком полимерном слое [1].

Экспериментальное определение трибологических показателей исследуемой системы. Экспериментальное изучение триботехнических характеристик проводилось разными методами: на базе машины трения И-47, с торцевой схемой трения [2]; на трибометре, позволяющем реализовать схему контактного взаимодействия цилиндр-пластина, имитирующей полное скольжение ж/д колеса по рельсу [2]. Испытания по схеме качения с проскальзыванием, воспроизводящие качение колеса по рельсу на машине трения СМЦ-2 при контактных давлениях 1200 МПа, соответствующих давлениям в системе колесо-рельс, позволили получить зависимость коэффициента сцепления от относительного проскальзывания и по ней оценить разные составы модификаторов трения. До проскальзывания 3% во всех испытанных вариантах имеет место снижение коэффициента трения в 3—4 раза по сравнению с

чистыми и сухими образцами (рис. 1), что соответствует одной из целей использования модификатора трения — обеспечения при проскальзывании более 5% такого уровня коэффициента сцепления, который не оказывал бы отрицательного влияния на тяговые характеристики локомотивов.

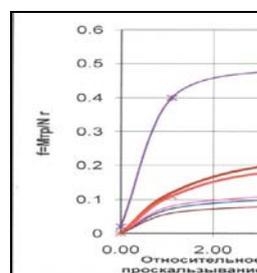


Рис.1 Зависимости коэффициента сцепления от относительного проскальзывания

Исследования показали, что долговечность модификатора трения зависит от толщины слоя и величины относительного проскальзывания, и примерно обратно пропорциональна проскальзыванию и толщине слоя.

Технико-экономическая оценка. Основной вклад в эффективность применения модификаторов трения дает экономия энергии на тягу за счет снижения сопротивления движению поездов. Расчетная оценка величины снижения расхода энергии проводилась для характерного участка длиной 250 км, в котором 8% — кривые со средним радиусом 550 м при потоке из 75 грузовых поездов со средней массой 4500 т. Снижение удельных затрат топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов при применении модификаторов трения, наносимого на поверхность катания, может составлять 3—4% в год, что дает значительную экономию финансовых ресурсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и ОАО «Российские железные дороги (код проекта 7 офи_м_РЖД).

1. Горячева И.Г., Захаров С.М., Краснов А.П., Юдин А.С., Торская Е.В., Марков Д.П., Жаров И.А. Оценка условий работы и требуемых свойств модификаторов трения для поверхностей катания системы «колесо—рельс» // Трение и износ. — 2013 (34), № 6, 547—553
2. Захаров С.М., Горячева И.Г., Краснов А.П., Юдин А.С., Морозов А.В., Марков Д.П., Наумкин А.В., Овечкин А.В. Трибологические исследования для разработки модификаторов трения в системе «колесо—рельс» // Трение и износ. — 2015 (36), № 6, 611—620

МНОГОЦИКЛОВОЕ ИСПЫТАНИЕ НА ТРЕНИЕ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Т.И. Зубарь, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; fix.tatyana@gmail.com

Введение. Механизмы трения и износа на микро- и наноуровне существенно отличаются от макроскопических из-за преобладающего влияния адгезии, поверхностных, капиллярных и межмолекулярных сил, химических эффектов и других факторов. Зондовые методы исследования позволяют детектировать ультамалые силы, что открывает широкие возможности для решения экспериментальных задач нанотрибологии [1, 2].

Целью работы являлось выявление механизмов трения и износа при многоцикловых испытаниях поверхности алюминия методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Материалы и методы

Исследования проводились с помощью АСМ НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) на полированной поверхности алюминия. Размер поля сканирования составлял 20×4 мкм. Использовался V-образный кремниевый кантилевер с коэффициентом жесткости 3 Н/м и радиусом закругления острия — 100 нм. Скорость движения зонда относительно поверхности составляла 16 мкм/с, нормальная нагрузка — 175 нН. Трение осуществлялось непрерывно на одном участке в течении 400 циклов.

Методика определения силы трения методом АСМ основана на регистрации угла закручивания кантилевера при движении его относительно образца в прямом и обратном направлении [2, 3]. Каждому циклу трения соответствует изображение топографии поверхности и карта распределения латеральных сил. Численное значение коэффициента трения и шероховатости является усредненной величиной по каждому изображению.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен график изменения коэффициента трения и шероховатости в процессе многоцикловых трибологических испытаний.

На начальном этапе зависимость линейна и перпендикулярна оси x . Это говорит об упругом безыносном трении. Контактное напряжение при испытаниях между зондом и поверхностью достигает 3 ГПа. При таких нагрузках становится возможным зарождение точечных дефектов. Их образование и перемещение в поверхностном слое требует затрат дополнительных латеральных сил, то есть силы трения будут возрастать. С увеличением количества циклов трения увеличивается количество дефектов кристаллической решетки и на участке 2 рисунка 1 коэффициент трения увеличивается до максимального значения 0,3.

На участке 3 точечные нульмерные дефекты

уступают место двумерным плоскостным, сдвиговое перемещение которых обеспечивает уменьшение коэффициента трения. Об увеличении количества дефектов свидетельствует рост шероховатости на участке спада графика коэффициента трения.

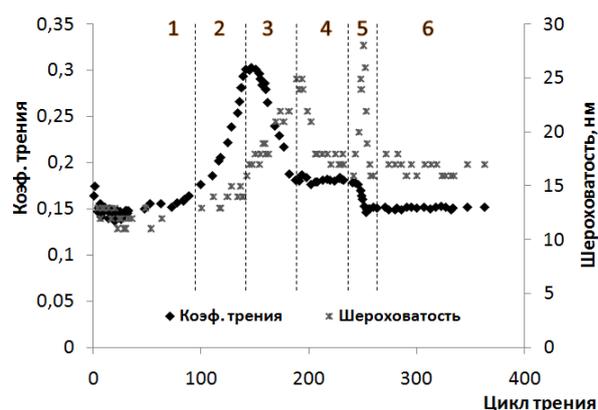


Рис. 1. Изменение значения коэффициента трения и шероховатости в процессе трения

Участок 4 характеризуется стабильностью свойств. Это объясняется тем, что поверхностный слой приобретает упорядоченную структуру.

В узкой области 5 между 240 и 260 циклом наблюдается резкий скачок шероховатости и падение значения коэффициента трения. Предполагается, что в этот момент происходит разрушение слоя оксида. Снижение силы трения можно объяснить наличием сдвигового перемещения разрушенного слоя оксида, который служит дополнительным смазкой. Участок 6 характеризуются стабильными свойствами, когда поверхностная структура упорядочена.

- Chizhik S.A., Rymuza Z., Chikunov V.V., Jarzabek D., and Kuznetsova T. Micro- and Nanoscale Testing of Tribomechanical Properties of Surfaces / In: Recent Advances in Mechatronics / Ed.: R. Jabłoński [et al.]. — Berlin: Springer. — 2007, 541—545
- Кузнецова Т.А., Зубарь Т.И., Магонов С.Н. (мл), Чижик С.А., Варшохинский Б., Лулицка О., Куприн А.С., Овчаренко В.Д., Толмачёва Г.Н., Голтвяница В.С. Исследование морфологии и коэффициента трения поверхности защитных покрытий Zr-Si-N методом АСМ // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. XII Междунар. конф., Минск, 18—21 окт. 2016 г. — Минск: Беларуская навука. — 2016, 144—148
- Кузнецова Т.А., Зубарь Т.И., Чижик С.А., Мясоедов Е.Н., Лапицкая В.А., Мишак А., Лабуда В. Исследование атомно-силовой микроскопией и наноиндентированием тонких поверхностных слоев, сформированных на поверхности вала пластическим деформированием // Приборостроение-2016. Матер. 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23—25 ноября 2016 г. — 2016, 338—340

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТОНКИХ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬНЫХ ПОДЛОЖКАХ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ С АЛМАЗНЫМ ЗОНДОМ

Т.А. Кузнецова¹, Б. Вархолински², Т.И. Зубарь¹, В.А. Лапицкая¹, А. Гилевич², С.А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; kuzn06@mail.ru

²Кошалинский технологический университет, Кошалин, Польша

Введение. Удельный износ является одной из основных характеристик для износостойких покрытий. Его определение для тонких нитридных покрытий толщиной 1—3 мкм и меньше, нанесенных на упругую стальную подложку, представляет собой довольно сложную техническую проблему, поскольку во многих случаях при стандартных испытаниях на трение по схеме шарик-диск с использованием сферического контртела из Al_2O_3 диаметром 10 мм происходит деформация подложки и разрушение покрытия не вследствие изнашивания поверхности, а из-за локального растрескивания и отслоения покрытия в местах наибольших механических напряжений [1, 2].

Атомно-силовой микроскоп (АСМ), оснащенный алмазным зондом на стальной консоли, дает возможность создать нагрузку на поверхность в диапазоне 10^{-3} — 10^{-6} Н. При радиусе острия около 100 нм нагрузка 10^{-3} Н позволяет создать напряжения при контакте с поверхностью износостойких покрытий около 50 ГПа и получить след износа. Визуализация АСМ данного следа при нагрузке 10^{-4} — 10^{-6} Н выявляет объем вынесенного материала по которому можно рассчитать удельный объемный износ [3, 4].

Целью данной работы являлось определение удельного объемного износа карбонитридных покрытий с различной концентрацией углерода методом АСМ.

Материалы и методы

Молибденовые карбонитридные покрытия были сформированы добавлением ацетилена (C_2H_2) в вакуумную камеру установки катодного дугового испарения TINA 900M [2, 4]. Толщина покрытий Mo(C)N составляла приблизительно 3 мкм.

Для исследования износостойкости покрытий использовали модель АСМ НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) зондом со стальной консолью с жесткостью 2660 Н/м, который обеспечивал нагрузку при износе $1,7 \cdot 10^{-3}$ Н. Полученный след сканировали при нагрузке $2,5 \cdot 10^{-4}$ Н.

Результаты и обсуждение

Микротвердость покрытий Mo(C)N, определенная наноиндентированием, составила $(35,8 \pm 3,6)$ — $41,6 \pm 3,6$ ГПа, модуль упругости — 357 ± 27 — (402 ± 30) ГПа [2]. Значения удельного объемного износа, рассчитанные по данным АСМ, составили $5,9 \cdot 10^{-14}$ — $1,0 \cdot 10^{-13}$ м³/Н·м. Значения, определенные для тех же покрытий профилометром

по следу износа, оставленного на поверхности покрытий Т-тестером, с использованием корундового шарика с нагрузкой 20 Н при длине пути 2000 м, составили $(4,7 \pm 1,6 \cdot 10^{-17})$ — $(3,0 \pm 0,2 \cdot 10^{-16})$ м³/Н·м. Большая величина износа, определенного АСМ, объясняется более высоким значением напряжений в пятне контакта, более точной визуализацией профиля следа износа и тем фактом, что при использовании алмазного зонда износ происходит только в покрытии, а в макро-тестере изнашивается и покрытие, и контртело, микротвердость которого значительно ниже, чем у испытуемых покрытий.

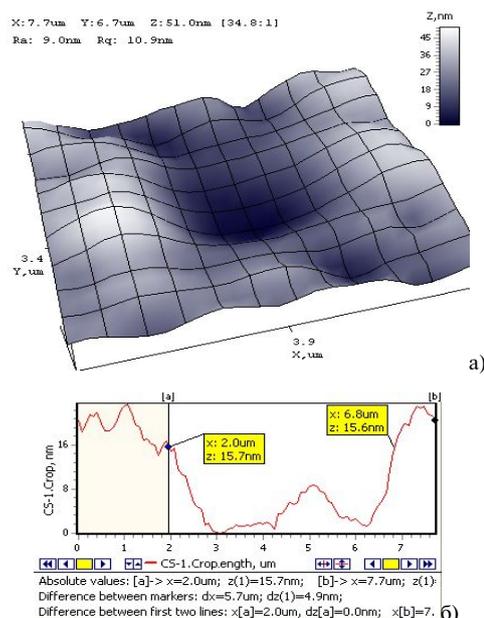


Рис. 1. След износа выполненного АСМ с алмазным зондом на поверхности покрытия MoN (а) и профиль через след (б)

- Кузнецова Т.А., Андреев М.А., Маркова Л.В. Исследование износостойкости комбинированных вакуумных электродуговых / Трение и износ. — 2005 (26), № 5, 521—529
- Warcholinski B., Gilewicz A., Kuznetsova T.A., Zubar T.I., Chizhik S.A., Abetkovskaia S.O., and Lapitskaya V.A. Mechanical Properties of Mo(C)N Coatings Deposited Using Cathodic Arc Evaporation // Surface & Coatings Technology. — 2017 (319), 117—128
- Chizhik S.A., Rymuza Z., Chikunov V.V., Jarzabek D., and Kuznetsova T. Micro- and nanoscale testing of tribomechanical properties of surfaces / Recent Advances in Mechatronics / Ed.: R. Jabłoński, et al. — Berlin: Springer. — 2007, 541—545
- Kuznetsova T., Zubar T., Chizhik S., Gilewicz A., Lupicka O., and Warcholinski B. Surface Microstructure of Mo(C)N Coatings Investigated by AFM // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2016 (25), no. 12, 5450—5459

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПО ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С АСИММЕТРИЧНЫМ ОРТОТРОПНЫМ ТРЕНИЕМ

Н.Н. Дмитриев¹, О.А. Силантьева¹, Е.М. Петроковец²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет; dn7@rambler.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Асимметрия силы трения, обусловленная вы-
раженным наклоном неровностей поверхности или
преимущественной ориентацией элементов структу-
ры поверхностных слоев контактирующих тел,
наблюдается при скольжении твердых тел по
направленно-армированным композитам, текстури-
рованным и анизотропным покрытиям на основе ок-
сидов металлов, а также при трении тканей [1], аук-
сетичных пористых материалов [2] и т.д.

Особый интерес представляют проявления
асимметричного ортотропного трения при движении
по инерции на финальном участке траектории. В
настоящей работе изучено движение диска, тонкого
кольца, тонкой эллиптической пластины и узкой
прямоугольной пластины (стержня) по горизонталь-
ной плоскости с асимметричным ортотропным тре-
нием при равномерном распределении контактного
давления. Предполагалось, что коэффициенты тре-
ния по направлению осей прямоугольной ортого-
нальной системы координат Ox и Oy больше, чем в
противоположном направлении, т.е. $f_{x-} = v_x f_{x+}$,
 $f_{y-} = v_y f_{y+}$, $v_x < 1$, $v_y < 1$. Если вектор скорости
точки направлен в третий квадрант, сила трения в
ней будет наименьшей по величине.

При сделанных допущениях показано, что при
движении диска и кольца непосредственно перед
остановкой вектор скорости центра масс направлен
в третий квадрант. Для эллиптической пластины,
когда эксцентриситет много меньше единицы, ско-
рость центра масс непосредственно перед остано-
вкой направлена также в третий квадрант, но рассто-
яние до предельного положения мгновенного центра
скоростей зависит от ориентации эллипса на плос-
кости [3].

Финальное движение узкой прямоугольной
пластины (стержня) характеризуется рядом особен-
ностей. Если при изотропном трении и равномерном
распределении контактного давления вектор скоро-
сти центра масс непосредственно перед остановкой
направлен перпендикулярно стержню [4], то при
асимметричном ортотропном трении происходит
наложение эффектов, связанных с трением и гео-
метрией области контакта [4, 5].

Определение значений β_* и ϑ_* при варьирова-

нии ϕ_* производилось двумя способами: 1) решени-
ем задачи Коши методом Рунге-Кутты с таким под-
бором начальных условий, чтобы остановка стержня
произошла в положении, соответствующем углу ϕ_* ;
2) решением системы уравнений:

$$\begin{aligned} T_n(\beta_*, \vartheta_*, \phi_*) &= 0, \\ \beta_* - \frac{IT_\tau(\beta_*, \vartheta_*, \phi_*)}{M(\beta_*, \vartheta_*, \phi_*)} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь $T_n(\beta_*, \vartheta_*, \phi_*)$ — проекция сил трения на ось,
перпендикулярную вектору скорости; $\beta = \frac{v}{\omega}$,

$T_\tau(\beta_*, \vartheta_*, \phi_*)$ — проекция сил трения на ось, совпа-
дающую по направлению с вектором скорости, I и
 $M(\beta_*, \vartheta_*, \phi_*)$ — момент инерции и момент сил тре-
ния относительно оси, проходящей через центр масс
перпендикулярно плоскости скольжения (звездочки
обозначают значения непосредственно перед остано-
вкой тела). Сопоставлением результатов выпол-
нялась проверка полученных значений.

Отметим, что существуют комбинации коэф-
фициентов матрицы трения и ориентации стержня
на плоскости, при которых реализуется только по-
ступательное финальное движение ($\beta_* \rightarrow \infty$). При
начальном чистом вращении центр масс однородно-
го стержня получает ускорение, направленное в тре-
тий квадрант.

1. Bueno M.A., Bocquet R., Tourlonias M., Rossi R.M., and Deller S. Study of Friction Mechanisms of Hairy Textile Fabrics // *Wear*. — 2013 (303), 343—353
2. Shil'ko S.V., Petrokovets E.M., and Pleskachevsky Yu.M. Prediction of Auxetic Phenomena in Nanoporous Materials // *Physica Status Solidi*. — 2008 (245), no. 11, 2445—2453
3. Дмитриев Н.Н., Силантьева О.А. Финальное движение тонкой эллиптической пластины по горизонтальной плоскости с ортотропным трением // *Вестник СПбГУ. Сер. 1*. — 2016, Т. 3 (61), вып. 1, 164—172
4. Розенблат Г.М. Динамические системы с сухим трением. — М.: Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. — 2006
5. Дмитриев Н.Н. Движение стержня со смещенным центром масс по плоскости с анизотропным трением // *Трение и износ*. — 2007 (28), № 4, 368—374

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФЛУКТУАЦИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия; bulgarevich@rambler.ru

Коэффициент трения является все еще плохо обоснованной с фундаментальной точки зрения величиной [1, 2]. В литературе отсутствует анализ того, что при смешанном трении контактируют переменное число шероховатостей и различное число частиц (атомов, молекул) на поверхностях трибоконтакта.

Цель: оценить относительную статистическую флуктуацию ε силы трения скольжения при смешанном и граничном трении. Пусть режим трения является стационарным. Величину ε силы трения скольжения \bar{f} по статистике для аддитивных величин [3] запишем как (1):

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(\Delta\bar{f})^2}}{|\bar{f}|}. \quad (1)$$

Здесь \bar{f} — суммарная сила трения на контактах пар шероховатостей трущихся тел, $\Delta\bar{f}$ — её отклонение в таких контактах, $\overline{(\Delta\bar{f})^2}$ — среднее квадратичное отклонение этой величины. Величина \bar{f} аддитивна по парам контактирующих шероховатостей (2). Здесь \bar{f}_i — сила трения на i -той паре. Имеем (2):

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_i^N (\bar{f}_i - \bar{f})^2}}{\left| \sum_i^N \bar{f}_i \right|}. \quad (2)$$

Подкоренное выражение в числителе и знаменатель в (5) пропорциональны среднему числу контактирующих пар \bar{N} (3). Отсюда

$$\varepsilon_1(\bar{N}) \propto \frac{\sqrt{\bar{N}}}{\bar{N}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{N}}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_1(\bar{N})$ — относительная флуктуация, связанная со средним числом пар в контакте. Относительная флуктуация числа невзаимодействующих частиц (у нас — контактирующих пар), также дается этой же формулой [3]. Полная оценка должна учесть молекулярную составляющую флуктуации силы трения в контакте. Её можно оценить как (4):

$$\varepsilon(\bar{f}) = \varepsilon_1(\bar{N}) + \varepsilon_2(\bar{n}), \quad (4)$$

где $\varepsilon_2(\bar{n})$ — относительная молекулярная флуктуация. Величину $\varepsilon_2(\bar{n})$ выразим через среднее число \bar{n} парных соседних молекулярных или атомных взаимодействий:

$$\varepsilon_2(\bar{n}) = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}. \quad (5)$$

Простейшая оценка. Например, в торцевой машине трения считали поверхности тел одинаковыми, поперечник шероховатостей 1 мкм, площадь контакта адсорбированной молекулы ПАВ $5 \cdot 10^{-20}$ м² [4], номинальная площадь контакта между телом и контртелом 1 см². долю площади непосредственного контакта от номинальной 10^{-4} [5]. Тогда среднее число пар \bar{N} шероховатостей в контакте 10^4 . Число частиц \bar{n} смазочного материала мономолекулярного слоя на поверхностях всех шероховатостей: $2 \cdot 10^{11}$, полная относительная флуктуация равна $\varepsilon(\bar{f}) = 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-4} \approx 10^{-2}$, т.е. 1%. Вклад от молекулярной составляющей в относительную флуктуацию мал, а вклад от числа контактирующих шероховатостей довольно велик. Если сравнить $\varepsilon(\bar{f})$ с относительной флуктуацией объемных термодинамических величин, пропорциональной $1/\sqrt{N}$, где число частиц N , которое может быть порядка числа Авогадро и больше, видно, что эти величины равны своим средним значениям с исключительной точностью в отличие от силы трения. Если величина шероховатости будет больше, например, 10 мкм, то $\varepsilon_1(N)$ становится порядка 0,1 или 10%. Относительная флуктуация силы трения связана с площадью контактирующей поверхности трения, пропорциональной l^2 , а объемные термодинамические величины пропорциональны l^3 , где l — поперечник термодинамической системы.

Вывод: При смешанном трении скольжения основной вклад в относительную флуктуацию силы трения вносят пары контактирующих шероховатостей трущихся тел. Эти флуктуации обеспечивают плохую воспроизводимость и переносимость сил и коэффициентов трения скольжения.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00116). Бойко М.В. выполнена работа по определению величин относительных флуктуаций силы трения.

1. Blau P. J. The Significance and Use of the Friction Coefficient // Tribology International. — 2001 (34), 585—591
2. Voinov K.N. The Influence of Oscillations for Coefficients of Friction on the Results of Calculations // XIV Int. scientific conf. "Tribology and reliability" (17—19 September). Saint-Petersburg. — 2014, 6—17
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. — М.: Наука. — 1964
4. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. — Л.: Химия. — 1981
5. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. Крагельского И.В. и Аликина В.В. — М.: Машиностроение. — 1978

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК ПРИЛОЖЕНИЯ ТРИБОЛОГИИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

Л.М. Богомолов¹, И.П. Дудченко¹, П.А. Каменев¹, И.А. Пантелеев²

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия; bleom@mail.ru

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Цель

Обсудить данные о движениях блоков земной коры вдоль поверхностей раздела (разломных зон), проявлениях этих движений в возмущениях геофизических полей (в частности параметров распространения электромагнитных, ЭМ, сигналов, и некоторые результаты лабораторных экспериментов на образцах геоматериалов. Эти три части доклада объединяются ввиду их взаимосвязи с вопросами трибологии геоматериалов, т.е. диэлектриков, слагающих земную кору.

Введение

Для моделирования сейсмических и деформационных явлений, связанных с перемещением на границе блоков, широко используется подвключающий эмпирическую зависимость от скорости коэффициента сухого трения на контактной поверхности блоков и называемый “rate and state friction law” (кратко, закон R&S, [1]). В числе таких явлений — зарождение землетрясений, ЗЛТ, форшоки и афтершоки [2,3], а также, предположительно, события медленного скольжения по разломам (Slow Slip Events, Silent Earthquakes), [4]. Подобные процессы, происходящие при переходе от состояния покоя или медленного стационарного движения берегов разлома (крипа) к подвижке с ускорением, могут вызывать вторичные возмущения геофизических полей. Принципиальную роль для уточнения физической природы ряда предвестников ЗЛТ может сыграть анализ крупномасштабных подвижек (другими словами динамических явлений) в инфразвуковом диапазоне частот, т.е. с периодами в сотни — тысячи секунд или еще больше. При этом своеобразным вызовом для теории может считаться обнаружение аномалий в амплитуде и фазе электромагнитных сигналов, распространяющихся в волноводе между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы [5]. Пример такого аномального возмущения приведен на рис. 1, где видно, что возмущение параметров сигналов начинается примерно за неделю до события (т.е. имеет предвестниковый характер), а затем, после ЗЛТ продолжается как отклик на сейсмические подвижки. В докладе представлены новые (модифицированные) критерии возникновения подвижек контактирующих блоков. Также обсуждаются результаты о влиянии малоамплитудных вибраций на неупругое деформирование образцов горных пород (по данным акустической эмиссии).

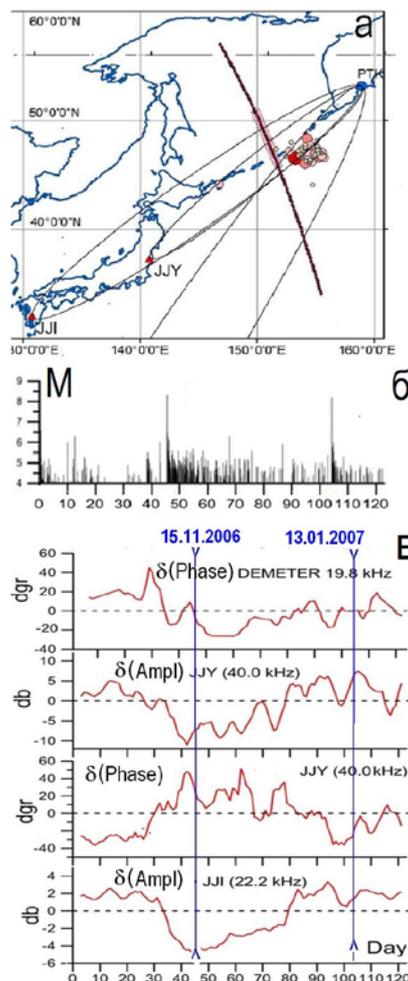


Рис. 1. Аномальные вариации амплитуды и фазы ЭМ сигналов в период с двумя Симуширскими ЗЛТ по данным со спутника DEMETER и наземным измерениям, согласно [6]: а — расположение эпицентров и афтершоковой области, орбиты спутника DEMETER, передатчиков (JJI, JJY) и приемника PTK; б — сейсмическая активность, в — зависимости параметров ОНЧ/НЧ сигналов

1. Dieterich J.H. Modeling of Rock Friction: 1. Experimental Results and Constitutive Equations // *J. Geophys. Res.* — 1979 (84), 2161—2168
2. Ben-Zion Y. and Rice J.R. Dynamic Simulation of Slip on a Smooth Fault in an Elastic Solid // *J. Geophys. Res.* — 1997 (102), no. 17, 17771 — 17784
3. Marone Ch. Laboratory Derived Friction Laws and Their Application to Seismic Faulting // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* — 1998 (26), 643—696
4. Kocharyan G.G. Kishkina S.B., Novikov V.A., and Ostapchuk A.A. Slow Slip Events: Parameters, Conditions of Occurrence, and Future Research Prospects // *Geodynamics & Tectonophysics.* — 2014 (5), no. 4, 863—891
5. Интернет-сайт: <http://vlf-data.ifz.ru/index.html> (Последнее обращение в 2013 г)

TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF THE SELF-LUBRICATING POLYMERS AGAINST STEEL 45 USING DIFFERENT VELOCITY

J. Padgurskas and G. Reškevičius

Institute of Power and Transport Machinery Engineering, Aleksandras Stulginskis University,
Kaunas, LITHUANIA, LT-53362; juozas.padgurskas@asu.lt, giedrius.reskevicius@gmail.com

Introduction

Thermoplastics are light, relatively cheap, they have a high wear resistance and self-lubricating properties. They can be used, because the mechanism works without maintenance, especially in cases where lubrication is difficult or provide or prohibited because of the specific operating mechanism.

Polymers, as polyamide (PA66) and polyoxymethylene (POM), are used for producing bearings, gears, rollers, vibration or noise dampers [1, 2] and other friction couples. Processing them into products require little energy, they are resistant to decomposition and aggressive chemicals, so they are very widely used in tribological applications. Self-lubricating polymers used in tribosystems are working under various conditions, usually without any lubrication. They have acquired popularity due to excellent characteristics, such as low noise level, good lubricity, low weight, high corrosion resistance and favorable friction due to the flexibility of linear molecular chains [3].

Self-lubrication is characterized by ability to transfer microscopic amounts of material to the mating surface. This transfer process creates a film that provides lubrication and reduces friction over the length.

Materials and Methods

Polyoxymethylene POM and polyamide PA66 nanocomposites, with different copper oxide and expanded graphite nanoparticles, concentrations 0, 0.5, 3 and 7.5% by volume, were used in this study as subjects of research.

Samples were made from moulded polymer materials, milling them into separate segments. Counter samples (ring $\varnothing 35$ mm \times 10 mm) were made of steel C45 (LST-EN 10083-1), hardened to 40 HRC, with surface roughness $Ra = 0.08$ — 0.1 μm .

Upgraded friction tribometer SMC-2 was used for determining all tests data of dry sliding friction pairs, using the block on ring simulation model of the friction pair. Through device software normal load force, sliding speed and testing time were controlled. Temperature, friction coefficient and torque data were collected to the personal computer (PC). The dimensions of the friction-

al couple are given in fig. 1.

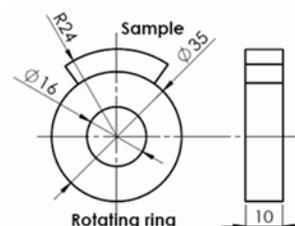


Fig. 1. The shapes and dimensions of the friction pair block-on-ring.

Results and Discussion

All obtained tribological data were analyzed through the influence of testing parameters and through the concentration of nanoparticles.

Compure POM with POM-CuO composite, particles increased values of hardness, density, flexural strength, however CuO particles decrease values of impact resistance.

Modified polyoxymethylene POM-C with small concentration (0.5% by volume) of graphite or copper oxide nanoparticles decreases sliding coefficient of friction at low speeds (up to 1 m/s). These compositions are also characterized by an increase of the critical sliding velocity. Modification of POM-C high concentration of nanoparticles (7.5% by volume) increases the coefficient of friction and reduces the critical speed. Modification of polyamide PA66 with graphite or copper oxide nanoparticles does not improve the friction coefficient and the critical slip speed

Acknowledgment

This study was funded by the Research Council of Lithuania (TAP LB-08/2015).

1. Dasari, A., Yu, Z.Z., and Mai, Y.W., Fundamental Aspects and Recent Progress on Wear/Scratch Damage in Polymer Nanocomposites // *Mater. Sci. Eng., R.* — 2009 (**63**), no. 2, 31—80
2. Nozawa J.-I., Komoto T., Kawai T., and Kumehara, Tribological Properties of Polymer-Sheet-Adhered Metal Hybrid Gear // *Wear.* — 2009 (**266**), 893—897
3. Mergler Y.J., Schaake R.P., and Huis In't Veld A.J. Material Transfer of POM in Sliding Contact // *Wear.* — 2004 (**294**), 256

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

В.Л. Басинюк¹, А.С. Калиниченко², М.А. Леванцевич¹, Е.И. Мардосевич¹, А.А. Глазунова¹

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Цель

Целью исследований является разработка методических подходов к работе пар трения скольжения, применяемых в вертикальных электрошпинделях прецизионного оборудования для высокоскоростной лезвийной обработки поверхностей из медных сплавов.

Методы исследований

Проведен анализ современных конструктивных и технологических решений электрошпинделей для высокоскоростной прецизионной обработки и режимы их работы при растачивании, фрезеровании и шлифовании. Для высокоточных станков при прецизионной обработке имеются очень жесткие нормы по точности и жесткости, а также допуски на биение шпинделя. Например, для внутришлифовального полуавтомата высокой точности с мощностью двигателя 9,23 кВт модели ЗК227А торцовое биение опорной поверхности шпинделя должно быть не более 1,0...1,5 мкм, а осевое биение шпинделя не более 0,5...1 мкм. Данные требования по биению обеспечивают высокую точность вращения электрошпинделя в радиальном и осевом направлении при широком диапазоне изменения числа оборотов.

Исследованиям тепловых и жесткостных факторов, оказывающих влияние на точность обработки на станках, посвящен ряд работ таких известных ученых, как Д.Н. Решетов, А.С. Пронников, А.П. Кузнецов, А.В. Пуш и др. Анализ результатов их исследований показал, что конструкции и условия функционирования шпиндельных опор, включая их охлаждение и режим смазки, оказывают существенное влияние на точность работы шпинделя. В качестве опор шпинделей могут быть применены подшипники скольжения и качения. Однако первые обладают повышенной точностью, но имеют определенные ограничения по допустимым скоростям скольжения, во многом определяемым служебными свойствами используемых в парах трения материалов, использование вторых не всегда позволяет достигнуть низкой шероховатости обработанных поверхностей.

Для решения задачи повышения износостойкости, теплостойкости, а также для увеличения точности высокоскоростной обработки в рамках проводимых исследований разработаны методические основы к созданию и рациональному конструированию пар трения скольжения на основе применения покрытий из композиционных антифрикционных материалов.

На рис. 1 приведена условная схема прецизионного электрошпинделя [1].

Методический подход. Ресурс работы узлов

трения в большинстве случаев зависит от условий смазывания. В настоящее время в качестве узлов трения все чаще применяют подшипники скольжения из композиционных материалов, которые при ограниченной смазке имеют коэффициент трения 0,04—0,06, со смазкой — 0,004—0,006, а скорость скольжения и давление могут достигать соответственно 20 м/сек и 6—8 МПа, что вполне приемлемо для высокоскоростной лезвийной обработки алмазным инструментом медных сплавов.

Для повышения теплопроводности и снижения инерционной массы в качестве материала для изготовления вала целесообразно использование алюминиевых сплавов. При этом на вал электрошпинделя закреплена теплоизолирующая (например, керамическая) втулка с переходной посадкой на некруглое отверстие на роторе, магнитоэлектрические модули двигателя размещены с внешней стороны для обеспечения теплоотвода от двигателя и опор скольжения. На ответных поверхностях вала электрошпинделя и подшипников скольжения формируется в качестве подложки МДО-покрытие толщиной 70—90 мкм. Затем осуществляется послойное поверхностное плакирование МДО-покрытия гибким инструментом с нанесением на него связующего и антифрикционного наноструктурированного материала.

Выводы. Использование сформированных в соответствии с приведенной выше схемой композиционных пар трения скольжения обеспечивает существенно лучшие, по сравнению с традиционно используемыми схемами, тепловые и динамические режимы их функционирования. Это, в сочетании с применением современных наноструктурированных материалов покрытий, позволяет существенно повысить допустимые скорости скольжения и на основе этого существенно расширить возможности использования пар трения скольжения в прецизионных электрошпинделях для скоростной лезвийной обработки деталей из цветных сплавов.

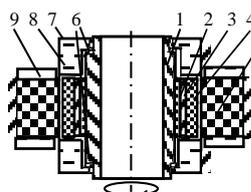


Рис. 1. Условная схема электрошпинделя: 1 — вал; 2, 3 — керамическая и стальная втулки; 4, 5 — постоянные магниты ротора и магнитоэлектрические модули статора электродвигателя; 6 — антифрикционные наноструктурированные композиционные покрытия; 7, 8, 9 — элементы системы охлаждения

1. Калиниченко А.С., Мардосевич Е.И., Глазунова А.А. Композиционные материалы для пар трения скольжения мехатронных систем // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин.ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2016, вып. 5, 386—389

РЕСУРС МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ТРИБОУЗЛОВ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА ИЛИ В АТМОСФЕРЕ

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова

Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия; alnikbltov@rambler.ru

Магнитная жидкость эффективно используется во многих трибоузлах современных машин и механизмов. Однако до настоящего времени отсутствует методика расчета ресурса магнитожидкостных узлов или устройств, которая бы учитывала именно физико-химические особенности строения магнитного масла. Предлагается ресурс магнитожидкостного трибоузла оценивать по промежутку времени в течение, которого, из-за испарения дисперсионной среды, концентрация магнитной фазы возрастает от начального значения ω_s до допустимого ω_f , которое в свою очередь определяется предельной вязкостью магнитного смазочного масла.

Для магнитожидкостного трибоузла, работающего в атмосферных условиях, при условии, когда поверхность магнитного масла полностью открыта ресурс t , можно рассчитать по следующей формуле:

$$t = \frac{\rho V}{\Psi_1} [\omega_f - \omega_s + \omega_s \ln \left(\frac{1 - \omega_s}{1 - \omega_f} \right)],$$

$$\Psi_1 = \frac{DCP_s \mu}{2RT \varepsilon_0} \left(1 + \frac{DC}{2\varepsilon_0 S (1 - \omega_s)} \sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}} \right), \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии молекул пара в окружающем газе, V — исходный (заправочный) объем магнитной жидкости, S — поверхность через которую происходит массоперенос (обычно, поверхность магнитной жидкости), T — абсолютная температура, μ — молярная масса, R — универсальная газовая постоянная, ε_0 — электрическая постоянная, C — эквивалентная электрическая емкость, P_s — давление насыщенных паров при данных условиях, ρ — плотность жидкой фазы.

В том случае, когда магнитная жидкость находится в полости с небольшим отверстием, ресурс магнитожидкостного подшипника рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{V(\omega_f - \omega_s)\rho}{\Psi_2},$$

(2)

где S_0 — площадь отверстия, h — длина канала отверстия.

Ресурс магнитожидкостного трибоузла работающего в вакууме, выражается следующим обра-

зом:

$$t = \left[V(\omega_f - \omega_s) + V\omega_s \ln \frac{1 - \omega_s}{1 - \omega_f} \right] \sqrt{2\pi\mu RT} \frac{\rho}{S\mu P_s}. \quad (3)$$

Формула (3) применяется тогда, когда можно пренебречь количеством молекул, которые конденсируются после испарения. В том случае, если испарившиеся молекулы диффундируют в вакуум по механизму молекулярной эффузии через малое отверстие площадью S_0 , время изменения концентрации дисперсионной фазы от ω_s до ω_f будет равно:

$$t = \frac{V(\omega_f - \omega_s)}{P_s S_0} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}. \quad (4)$$

Результаты расчета ресурса магнитожидкостного подшипника для двух температур эксплуатации и двух различных условий испарения дисперсионной среды, от которых зависит скорость рассеяния пара, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Ресурс магнитожидкостных подшипников при различных условиях испытаний (ММ-ДОС, ММ-ХС — магнитные жидкости соответственно на основе диоктилсебацата и хлорфенилсилоксана)

Условия испытаний		Ресурс, годы	
Положение поверхности испарения	Температура, °С	ММ-ДОС, атмосфера	ММ-ХС, вакуум
Поверхность масла полностью открыта	20	6,9	0,17
	100	0,13	$3 \cdot 10^{-4}$
Масло находится в полости с отверстием	20	28,7	13
	100	0,53	$2 \cdot 10^{-3}$

При правильно выбранном составе магнитной жидкости, использовании рациональной конструкции трибоузла, и щадящего температурного режима работы, испарение дисперсионной среды не будет жестко лимитировать срок службы триботехнического изделия.

Таким образом, формулы (1—4) позволяют с приемлемой для инженерных расчетов точностью оценить ресурс магнитожидкостных трибоузлов, который равен времени, по прошествии которого объемная концентрация дисперсионной фазы возрастает до недопустимого значения из-за испарения несущей жидкости.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ В ПОЛИМЕР-ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян, А.Э. Багдасарян

Национальный политехнический университет, Ереван, Армения; ars.karapetyan@yahoo.com

Введение

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что полимер-полимер пары трения прочно вошли в современную технику и широко применяются в узлах трения точных приборов и миниатюрных микроэлектромеханических устройствах [1—3].

Полимер-полимер пары трения в основном используются в качестве материалов для микроподшипников скольжения (втулки, валики). Применение многих промышленных антифрикционных полимерных материалов не оптимизировано и трибологическое поведение полимер-полимерных микроподшипников скольжения недостаточно изучено. В частности, очень важен приработочный процесс микроподшипников, когда происходит предварительное смещение при переходе от статического трения к кинетическому. Работоспособность и долговечность микроподшипников скольжения из полимер-полимер пар трения во многом зависит от трибологических свойств и размерной точности деталей сопряжения, а также от значения оптимального диаметрального зазора подшипника (в сопряжении с валиком) и от точности сохранения допустимого зазора и натяга при эксплуатации и хранении. Исследование влияния эксплуатационных условий — статической нагрузки, скорости скольжения, а также времени предварительного контакта на стартовый процесс, когда происходит переход статического трения на кинетическое трение, является очень важным и актуальным для полимерных микроподшипников.

Цель — исследование влияния эксплуатационных условий и диаметрального зазора на процесс статического трения в полимер-полимерных микроподшипниках скольжения.

Материалы и методы

Для исследований были использованы различные по физико-механическим свойствам, химическому составу и строению антифрикционные полимерные материалы, такие как полиацетаты, полиамиды, полиимиды, полифениленоксид, поликарбонат, АБС пластики, широко применяемые в полимер-полимерных микроподшипниках скольжения.

Экспериментальные исследования перехода от статического к кинетическому трению были проведены в лабораторных условиях на трибометре [4]. Трибологические свойства материалов оценивались при следующих режимах испытания: статическая нагрузка во время покоя перед началом движения (поворота валика-приложения движущего момента

вращения) изменялась в пределах от 8 до 30 Н, скорость скольжения — от 4,3 до 101,6 мкм/с, а время предварительного контакта под статической нагрузкой (время стоянки перед пуском) — от 5 до 900 с. Цикл испытаний при исследуемых режимах составлял 10 часов.

Результаты и обсуждение

На основании результатов трибологических исследований получены двухмерные зависимости коэффициента трения: от статической нагрузки и времени предварительного контакта при разных скоростях скольжения, от скорости скольжения и времени предварительного контакта при разных нагрузках, а также от нагрузки и скорости скольжения при разных временах предварительного контакта. Такие зависимости хорошо суммируют влияние нагрузки и скорости скольжения, а также времени стоянки перед пуском на коэффициент трения пары трения полимер-полимер. Так, повышение скорости скольжения от 4,3 до 101,6 мкм/с при исследуемых нагрузках и временах стоянки перед пуском приводит к существенному повышению коэффициента трения; повышение нагрузки от 8 до 30 Н при исследуемых скоростях скольжения и временах стоянки перед пуском — к существенному снижению коэффициента трения; повышение времени предварительного контакта от 5 до 900 с — к значительному повышению времени предварительного смещения и значения коэффициента трения.

Заключение

Проведенные исследования дополняют наши представления о влиянии эксплуатационных условий и диаметрального зазора на стартовый процесс полимер-полимерных микроподшипников скольжения, когда происходит переход статического трения на кинетическое трение. Для исследуемых пар сухого трения найдены оптимальные значения нагрузки, скорости скольжения и времени предварительного контакта, а также диаметрального зазора, обеспечивающие минимальные значения коэффициента трения и износа сопряженных деталей.

1. Полимеры в узлах трения машин и механизмов: Справочник / Под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. — 1980
2. Rymuza Z. Friction, Wear and Lubrication in Particular Polymer-Polymer // Tribologia. — 1989, no. 3(79), 281—286
3. Rymuza Z. Tribology of Miniature Systems. — Amsterdam: Elsevier. — 1989
4. Rymuza Z., Kusznierewicz Z., and Manturzyk G. Testing Miniature, in Particular Polymer-Polymer, Journal Bearings // Wear. — 1994 (174), 39—46

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКАХ

Г.В. Кожевникова

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь; fti@tut.by

При поперечной и поперечно-клиновой прокатках трение, возникающее на контактной поверхности между деформируемым металлом и инструментом, оказывает существенное влияние на процесс прокатки. Коэффициент трения на контактной поверхности зависит от свойств прокатываемых материалов, в том числе окалины, температуры нагрева заготовки и шероховатости поверхности инструмента. В свою очередь от контактного трения зависят давление металла на инструмент, расход энергии на прокатку, течение металла в очаге деформации, качество поверхности и однородность структуры прокатываемых заготовок [1]. Трение на контактной поверхности является одним из важнейших критериев устойчивого протекания процессов поперечной и поперечно-клиновой прокатки: если оно недостаточно для передачи требуемой энергии от инструмента к заготовке происходит потеря сцепления заготовки с инструментом [2, 3]. Значения и распределение трения на контакте инструмент—заготовка при прокатке являются определяющими факторами для подбора оптимальных параметров процесса.

Вращение заготовки при поперечной прокатке по отношению к инструменту запаздывает, угловая скорость вращения заготовки меньше угловой скорости вращения условного жесткого цилиндра диаметром, равным расстоянию между инструментальными плитами. Это явление названо проскальзыванием заготовки по инструменту, которое количественно оценивается коэффициентом скольжения — отношением угловых скоростей вращения заготовки и условного жесткого цилиндра [2]. Эффект проскальзывания заготовки по инструменту отмечается всеми исследователями поперечной и поперечно-клиновой прокатки. Предложен [3] параметр проскальзывания — отношение скорости перемещения инструмента к скорости течения частиц металла в приконтактном слое очага деформации заготовки $v_{ин}/v_{кон}$. Это величина относительная, не зависящая от масштабного фактора. Увеличение размеров заготовки не сказывается на коэффициенте трения, это подтверждается многолетним опытом реализации процессов прокатки. Скорость течения металла в приконтактном слое фиксировалась экспериментально методом муара и теоретически компьютерным моделированием. Рассогласование скоростей $v_{ин}$ и $v_{кон}$ определяют величину трения на контакте [3].

Подтверждена закономерность самоустановления сил трения при прокатке: с увеличением обжа-

тия возрастает момент сил, препятствующий вращению заготовки, который автоматически компенсируется ростом момента сил, способствующих вращению в результате увеличения проскальзывания заготовки по инструменту. Определена линейная зависимость между коэффициентом трения (по Амонтону) и проскальзыванием заготовки по инструменту при поперечной прокатке.

Эффект самоустановления сил трения подтвержден решением методом верхнеграничной оценки задачи вдавливания гребешка в идеально-пластическое тело, перемещаемое перпендикулярно направлению вдавливания [4].

Характерное проскальзывание заготовки по инструменту при поперечно-клиновой прокатке оценивается радиусом качения: отношением скорости движения инструмента к угловой скорости вращения заготовки. Определено, что увеличение степени обжатия при поперечно-клиновой прокатке приводит к росту энергии формообразования и, как следствие, к уменьшению радиуса качения, так как увеличение при этом проскальзывания заготовки по инструменту вызывает рост сил трения, следовательно, и энергии, передаваемой от инструмента к заготовке. В итоге радиус качения самоустанавливается на уровне, обеспечивающем равенство моментов сил, способствующих и препятствующих вращению заготовки.

Согласно компьютерному моделированию процессов поперечно-клиновой прокатки, трение возрастает вдоль наклонной площадки контакта заготовки с клиновым инструментом и максимум его достигает в месте перехода наклонной грани площадки контакта в калибрующую. Вдоль калибрующей площадки контакта трение относительно постоянно.

Выявленная закономерность самоустановления сил трения при поперечно-клиновой прокатке позволила оптимизировать техпроцессы по условию прокатки без потери сцепления заготовки с инструментом.

1. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. — М.: Металлургия. — 1970
2. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. — Мн.: Наука и техника. — 1986
3. Кожевникова Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки. — Минск: Беларус. Навука. — 2010
4. Кожевникова Г.В. Самоустановление сил трения при поперечной прокатке // Трение и износ. — 2016 (37), № 4, 421—426

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ВАГОНОВ

В.И. Колесников, А.П. Сычев

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия; alexc_sap@mail.ru

Повышение безопасности движения подвижного состава тесно связано с проблемами надежности и долговечности узлов трения. Для длительного функционирования узла трения необходимо создать устойчивые слои между поверхностями трения. Эти слои, разъединяя и препятствуя сближению поверхностей трения, могут значительно понизить силу трения, а вследствие этого и износ, уменьшая напряженное состояние в приповерхностных областях трущихся твердых тел. При металлополимерных трибосопряжениях роль разделяющего слоя должна выполнять пленка фрикционного переноса, которую в процессе фрикционного взаимодействия металлополимерной пары полимер образует на металлической поверхности контртела, что является причиной низкого трения и высокой износостойкости [1—2].

Сохранение конкурентоспособности железнодорожных грузовых перевозок сопровождается неуклонным ростом осевых нагрузок грузовых вагонов. При этих условиях значительное влияние на ходовые характеристики вагона, особенно при движении в кривых, оказывает работа пятникового узла грузового вагона. Именно эффективно работающий пятниковый узел позволяет уменьшить угол набегающего колеса на рельс, и, тем самым, снизить подрез гребня и расход энергоресурсов на тягу поездов.

Решением, позволяющим существенно повысить эффективность, долговечность и надежность пятникового узла, является значительное изменение его конструкции либо замена наиболее распространенных тележек модели ЦНИИ-ХЗ на другие. Осуществление этой задачи одновременно практически невозможно — только на сети ОАО «РЖД» таких тележек более двух миллионов, а также, по несколько сотен тысяч — в странах СНГ и Балтии.

В связи с этим, решение этой проблемы лежит в модернизации наиболее распространенных в настоящее время тележек модели 18—100. Ведущими вагоностроительными фирмами предлагаются различные направления модернизации для снижения износов взаимодействующих поверхностей узла пятник-подпятник грузового вагона: увеличение диаметров опорных поверхностей с 300 мм до 406 мм и даже до 711 мм с целью уменьшения удельных нагрузок и увеличения плеча парирующей силы при крене кузова; применение скользунув, постоянно контактирующих с опорами кузова с целью полной ликвидации колебания перевалки; увеличе-

ние диаметров опорных поверхностей до 450 мм с заменой плоского контактирования деталей на контактирование плоско-сферическое или плоско-коническое; применение более совершенных амортизационных устройств; использование тонкой стальной прокладки из высокопрочной марганцовистой стали; использование композиционной вставки.

В настоящее время распространенным решением является применение прокладок из марганцовистой стали. Тем не менее этот метод не обеспечивает существенного снижения износа поверхности пятника грузового вагона, ремонт которого является трудоемкой и дорогостоящей операцией. В связи с этим поставлена задача разработать способ повышения эффективности работы узла в целом.

Решение этой проблемы разделяется на две, различные по подходам, задачи, связанные с обеспечением надежной работы этого трибосопряжения — пятник и подпятник. Для решения первой задачи, (эффективной работы пятника) необходима специальная обработка контактирующей поверхности, например магнито-электро-искровым способом. Вторая задача (подпятник) решается путем использования твердых смазочных материалов с заданными свойствами, а также применение новых антифрикционных и высокоизносостойких полимерных наноматериалов.

Создан принципиально новый способ нанесения на поверхности узла многослойного антифрикционного наноструктурированного покрытия. Он представляет собой нанесение двух слоев — силового каркаса на металл и антифрикционного материала поверх силового каркаса.

Проведенные исследования позволили, выбрать наиболее стойкие антифрикционные компоненты и создать антифрикционные материалы для узлов трения подвижного состава и разработать наноструктурированное антифрикционное покрытие, обладающее свойством блокировки негативных сегрегационных явлений в металле.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00116).

1. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах. — М.: Наука. — 2003
2. Колесников В.И., Козаков А.Т., Сидашов А.В., Кравченко В.Н., Сычев А.П. Диффузионные процессы в металлополимерной трибосистеме // Трение и износ. — 2006 (27), № 4, 361—365

ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АБРАЗИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МОНОКРИСТАЛЛОМ АЛМАЗА

А.М. Кузей¹, В.Д. Бабич²

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь; anatkuzei@mail.ru

²Институт гражданской защиты МЧС Беларуси, Светлая Роща Минской обл., Беларусь

Введение. Основным технологическим процессом обработки монокристаллов алмаза, несмотря на развитие лазерной техники, является алмазобразивное шлифование (полирование). Особенностью абразивной обработки монокристаллов алмаза является то, что твердость инструмента — единичного алмазного зерна — меньше твердости обрабатываемого материала. Композиционные материалы, используемые при обработке монокристаллов алмаза, помимо алмазных зерен, содержат наполнители, которые косвенным образом влияют на процесс износа монокристалла, а именно — повышают алмазодержание, изменяют скорость износа матрицы композиционного материала.

Материалы и методы. Методами электронной сканирующей микроскопии изучено влияние наполнителей (карбида кремния, боратного стекла) на морфологию поверхности износа и структуру нарушенного слоя монокристалла алмаза.

Результаты и их обсуждение. Шлифование монокристаллов алмаза с производительностью 0,046 карат/мин композиционными материалами (АС-8, 80/63 — 30 об.%, наполнитель — 50/40, 25 об.%, полимер — остальное) с карбидом кремния и стеклом приводит к формированию различных микрорельефов на поверхности монокристалла (рис. 1).

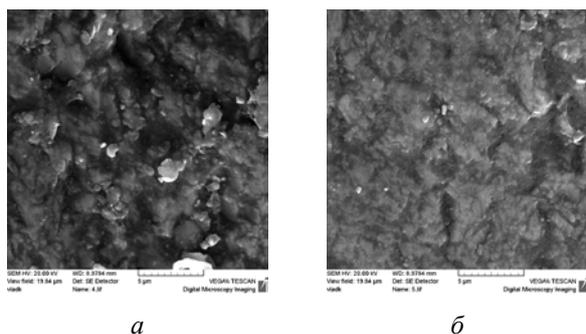


Рис. 1. Морфология поверхности износа монокристалла алмаза после обработки композиционными материалами: а — с карбидом кремния; б — с боратным стеклом

Шлифование монокристалла композиционным материалом с карбидом кремния формирует на его поверхности грубый микрорельеф, представляющий собой совокупность углублений, гребней, борозд, ориентированных в направлении обработки. На поверхности монокристалла, даже после обработки в расплаве гидроксида калия, присутствуют частицы

карбида кремния. При шлифовании монокристалла композиционным материалом с боратным стеклом формируются сглаженные микрорельефы, представляющие собой совокупность углублений, разделяющих выступы с плоскими вершинами.

В структуре нарушенного слоя, образующегося после обработки монокристалла композиционным материалом с карбидом кремния, присутствуют частицы карбида кремния меньших размеров, чем в композиционном материале (рис. 2).

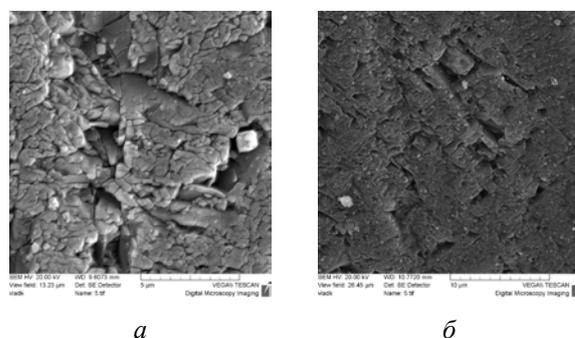


Рис. 2. Структура нарушенного слоя монокристалла алмаза после обработки композиционными материалами: а — с карбидом кремния; б — с боратным стеклом

Основным механизмом износа монокристалла при алмазобразивной обработке является хрупкое разрушение. При внедрении вершины алмазного зерна в монокристалл и ее перемещении вокруг нее образуются области растяжения-сжатия, а затем слой, пронизанный сетью микротрещин — нарушенный слой [1]. Последующие контакты алмазных зерен с нарушенным слоем приводят к его частичному разрушению и одновременно увеличению его толщины. Характер изменения морфологии поверхности износа, состава и структуры нарушенного слоя монокристаллов алмаза при обработке композиционными материалами с карбидом кремния и боратным стеклом показывает, что частицы карбида кремния участвуют в процессе износа алмаза. Вследствие высокой прочности карбида кремния частицы вместе с зернами алмаза формируют и разрушают нарушенный слой, приводя к износу монокристалла.

1. Семенова-Тян-Шанская А.С. Взаимосвязь микротвердости и износа алмаза в различных кристаллографических направлениях // Алмазы. — 1972, № 8, 12—13

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ПОКОЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ

В.А. Лапицкая, Т.И. Зубарь, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; vasilinka.92@mail.ru

Введение. Методика определения силы и коэффициента трения скольжения методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) основана на регистрации угла закручивания кантилевера при его движении относительно поверхности в прямом и обратном направлении в контактом режиме. Разность между величиной латерального закручивания консоли прямо пропорциональна значениям силы и коэффициента трения [1, 2]. Движение зонда в АСМ по поверхности возвратно-поступательное и на начальном этапе сканирования каждого профиля зонду необходимо преодолевать силу трения покоя. Для оценки вклада силы трения покоя в значение силы трения скольжения, определенной методом АСМ, в данной работе предложена методика определения ее величины.

Цель работы состоит в определении величины и оценке влияния силы трения покоя с методом АСМ.

Материалы и методы

В работе использовался стандартный V-образный кремниевый зонд с коэффициентом жесткости 3 Н/м, скорость движения острия относительно поверхности — 34 мкм/с, нормальная нагрузка — 440 нН. Измерения проводили на пластине кремния [100], на котором выбирались участки размером 40×40 мкм. Для определения трибологических характеристик строилось 30 профилей прямого и обратного хода в режиме латеральных сил для каждого изображения. Из разности средних значений отклонений консоли при прямом и обратном движении зонда рассчитываются значения силы и коэффициента трения [2, 3]. Для статистической оценки трибологических свойств строились усредненные профили, вид которых приведен на рис. 1.

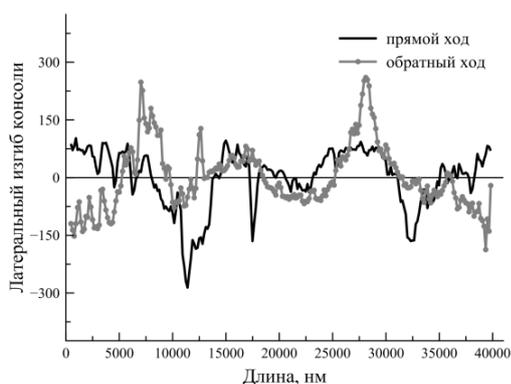


Рис. 1. Усредненные профили прямого и обратного хода на поверхности кремния

Результаты и обсуждение

Для визуализации присутствия силы трения покоя был построен профиль, представляющий собой разность между усредненными профилями прямого и обратного хода (рис. 2). Из рисунка видно, что края профиля имеют более высокие значения по сравнению с центральной частью. Это говорит о завышенном значении силы трения в этих областях, что объясняется действием силы трения покоя.

Для получения численного значения силы трения покоя центральную часть, характеризующую трение скольжения приравняли к нулю. Площадь выделенных на рис. 2 фигур прямо пропорциональна силе трения покоя [2, 3].

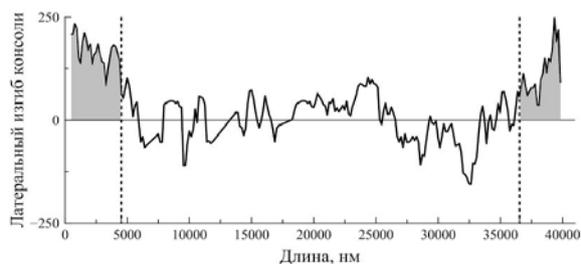


Рис. 2. Разность между профилями прямого и обратного хода

В результате использования предложенной методики оценки влияния силы трения покоя установлено, что в трибопаре «кремниевый зонд-поверхность кремния» при описанных выше условиях сила трения покоя равна 4 нН при общей силе трения скольжения — 97 нН. Действие этой силы распространяется на длину около 4 мкм с каждой стороны, что составляет 20% от всей длины профиля. При уменьшении исследуемой области влияние силы трения покоя на трибологические свойства материалов будет возрастать.

1. Chizhik S.A., Rymuza Z., Chikunov V.V., Jarzabek D., and Kuznetsova T. Micro- and Nanoscale Testing of Tribomechanical Properties of Surfaces / Recent Advances in Mechatronics / Ed.: R. Jabłoński, et al. — Berlin: Springer. — 2007, 541—545
2. Кузнецова Т.А., Ширияева Т.И., Чижик Н.В. Использование частиц порошков в качестве наконечников зондов для сканирующей зондовой микроскопии при исследовании физико-механических свойств материалов [Текст] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. X Междунар. конф., Минск, 13—16 ноября / редкол.: С.А. Чижик (пред.) [и др.] — Минск: Беларус. навука. — 2012, 358—363
3. Warcholinski B., Gilewicz A., Kuznetsova T.A., Zubar T.I., Chizhik S.A., Abetkovskaia S.O., and Lapitskaya V.A. Mechanical Properties of Mo(C)N Coatings Deposited using Cathodic Arc Evaporation // Surface & Coatings Technology. — 2017 (319), 117—128

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПО РАБОТЕ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, nilpt@tut.by

Введение. Работа выхода электрона (РВЭ) является одной из фундаментальных физических характеристик твердого тела. Данный параметр содержит информацию о химических, структурных, механических, электронных и др. свойствах поверхности и в определенной степени характеризует ее состояние.

В настоящее время наиболее широкое распространение для измерения РВЭ получили методы контактной разности потенциалов (КРП). В этих методах эталонный (зондовый) образец образует с измеряемой поверхностью конденсатор, между обкладками которого, вследствие разности РВЭ, возникает КРП (электричество А. Вольта). В общем случае методы КРП являются бесконтактными, не требуют создания специфических условий окружающей среды, т.е. работоспособны как на воздухе, так и в вакууме или в контролируемых средах. Их отличительной особенностью является измерение относительно большого участка поверхности (до нескольких квадратных миллиметров). При этом в случае металлов и сплавов толщина слоя, участвующего в формировании информации, составляет несколько десятых долей нанометра, что сопоставимо с туннельной и атомно-силовой микроскопией.

Методы измерения КРП имеют относительно простое практическое воплощение. Это позволяет использовать их для контроля состояния трущейся поверхности [1]. Однако, на практике метод реализуется, как правило, на простейших лабораторных установках, состоящих из серийно выпускаемых измерительных приборов универсального назначения (предусилители, фазовые детекторы интеграторы и т.д.). Отсутствие функционально законченных измерительных устройств сдерживает широкое использование и ограничивает эффективность методов КРП в области трибомониторинга.

Целью работы является разработка унифицированных подходов к конструированию функционально законченных измерителей КРП и построению на их основе средств мониторинга трибосистем по параметрам РВЭ трущейся поверхности.

Материалы и методы. На рис. 1 представлена структурная схема измерителя КРП. Типовое использование измерителей КРП включает подачу выходного аналогового напряжения, равного КРП между вибрирующим (по средствам модулятора 1) эталонным образцом M_1 и контролируемой поверхностью M_2 на вход регистратора и дальнейшего сбора, и обработки измерительных данных. Величина КРП определяется по напряжению компенсации, вырабатываемом автоматически. Автокомпенсация

осуществляется с помощью фазочувствительной следящей системы (фазовый детектор 6 и интегратор 7). Следящая система представляет собой систему автоматического регулирования, воспроизводящую на выходе с определенной точностью (0,1—1 мВ) входное задающее воздействие. Габариты измерителя составляют 60×40×20 мм.

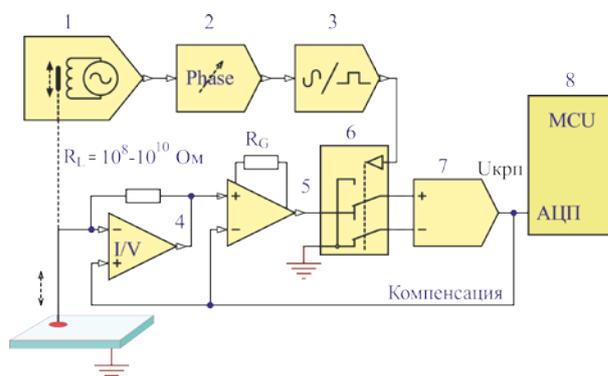


Рис. 1. Структурная схема измерителя КРП: M_1 и M_2 — эталонный и измеряемый образцы, соответственно; 1 — электромеханический вибратор; 2 — фазосдвигатель; 3 — формирователь сигнала; 4 — преобразователь ток—напряжение; 5 — инструментальный усилитель; 6 — фазовый детектор; 7 — интегратор; 8 — регистрирующее устройство; $U_{крп}$ — сигнал контактной разности потенциалов

При длительной регистрации процесса, когда нет необходимости в промежуточной обработке данных, достаточно использование простейших аналоговых (самопишущий потенциометр) или цифровых (*Data Logger*) регистраторов 8.

В данной работе для обеспечения автономности и возможности использования разработанных измерителей КРП в составе различных испытательных стендов, технологических линий, а также в качестве встраиваемых датчиков для контроля трибосистем, разработан *Data Logger* на базе микроконтроллера STM32F103C8T6. Носителем информации является карта памяти типа *SD*. Запись осуществляется в файл с расширением *txt*, что позволяет легко экспортировать результаты измерений для последующей обработки. Максимальный размер файла составляет 5 Мб (60 млн. отсчетов). В составе регистратора имеются часы реального времени с автономным питанием от батареи, не требующие подстройки даты и времени.

1. Pansialeyeu K., Zharin A., Opielak M., and Rogalski P. Charge Sensitive Techniques in Tribology Studies // *Przegląd Elektrotechniczny*. — 2016 (92), № 11, 239—243

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X

В.П. Селькин, О.С. Стерехов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
selkin_v@mail.ru

Введение. Компания Shimadzu Corporation (Япония) — один из крупнейших мировых производителей в отрасли научного приборостроения. Лидирующие позиции в мире занимает их оборудование для проведения механических испытаний при растяжении, изгибе и сжатии различных материалов, в частности универсальные испытательные машины серии Autograph AGS-X. При незначительной доработке данное оборудование может успешно применяться и для проведения высокоточных триботехнических исследований.

Цель — разработка методики и дополнительной оснастки для исследования коэффициента трения композиционных полимерных материалов на испытательной машине SHIMADZU Autograph AGS-1 kNX.

Методика и оснастка. Для измерения величины трения скольжения испытательную машину снабдили специальным приспособлением, в котором находящийся под нагрузкой образец исследуемого материала посредством гибкой тяги соединен с датчиком силы, закрепленным на подвижной консоли машины (рис. 1).

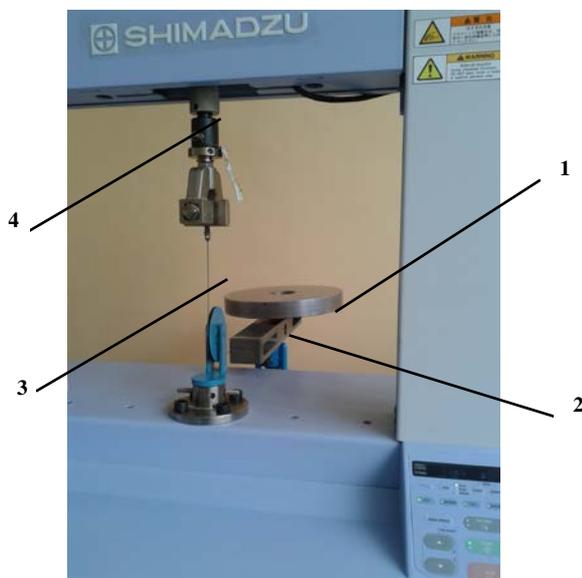


Рис. 1. Приспособление к машине SHIMADZU Autograph AGS-X для исследования коэффициента трения композитов: 1 — груз с закрепленным в нем образцом исследуемого материала; 2 — контртело; 3 — соединенная с образцом гибкая тяга; 4 — датчик силы

Контртело с дорожкой трения длиной 500 мм изготавливается из металла с заданной шероховатостью. При необходимости на дорожку трения нано-

сятся смазочные составы. Нормальная нагрузка на образец задается выбором величины груза, в котором закрепляют образец, и площадью поверхности трения образца исследуемого материала. Скорость скольжения и величина пути трения задаются испытательной машиной. Диапазон скоростей скольжения от 1 мкм/мин до 1 м/мин позволяет определять как кинетический, так и статический коэффициент трения материала. Точность измерения машиной величины силы трения скольжения в пределах $\pm 0,5\%$ от значения силы. Как установлено, дополнительная погрешность измерения силы трения за счет сопротивления гибкой тяги и ролика вращения не превышает 2%.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний записываются стандартной программой, используемой при растяжении образцов. В качестве примера приведена запись измерения величины силы трения скольжения по стали композиции поливинилиденфторида (ПВДФ) с 40 мас.% углеродных волокон (рис. 2).

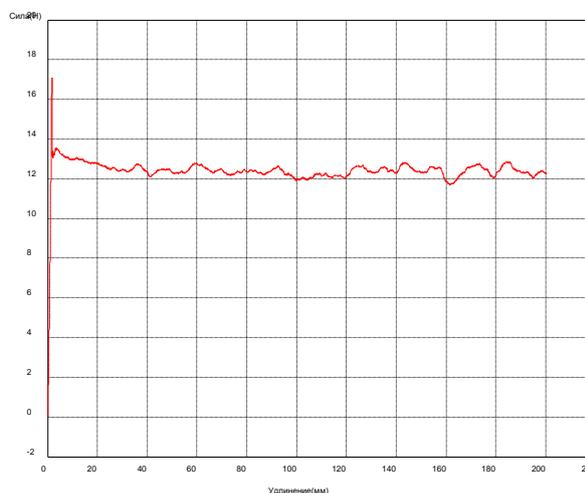


Рис. 2. Диаграмма зависимости величины силы трения скольжения по стали от пути трения композиции ПВДФ при нормальной нагрузке 100 Н

Выводы. Разработанная методика и оснастка позволяют при помощи стандартной машины SHIMADZU Autograph AGS-X с достаточно высокой точностью определять коэффициент трения скольжения исследуемых материалов в широком диапазоне скоростей, как при сухом трении, так и при трении со смазкой.

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ИНДЕНТОРОВ С МНОГОСЛОЙНЫМ УПРУГИМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

Е.В. Торская

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

При решении контактных задач шероховатость часто моделируется периодической системой инденторов для анализа эффекта взаимного влияния для различной геометрии модели и изучения реальной площади контакта в зависимости от средней нагрузки на период [1]. Метод решения периодической контактной задачи для тел с покрытием был разработан в [2]. В данной работе рассматривается задача многоуровневого периодического контакта для лучшего моделирования реальной шероховатости. Каждый уровень имеет свою геометрию инденторов. Контр-телом является двухслойное упругое полупространство.

Рассмотрим периодическую систему инденторов, форма которых описывается гладкими функциями $z = f_m(r) + h_m$, где h_m ($m=1..k$) — высота уровня m . Условия контакта определяются соотношением:

$$\begin{aligned} w(\bar{r}) &= f_m(\bar{r} - \bar{r}_i) - \delta, \quad \bar{r} \in \omega_{im}, \\ \sigma_z &= 0, \quad \bar{r} \notin \omega_{im}, \quad m = 1..k, \quad i = 1, 2, \dots, \infty. \\ \tau_{rz} &= 0, \quad \tau_{\theta z} = 0, \quad 0 \leq |\bar{r}| < \infty \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ω_{im} — пятно контакта для уровня m , w , σ_z , τ_{rz} , $\tau_{\theta z}$ — вертикальные перемещения и напряжения в цилиндрической системе координат. На границе раздела покрытия с подложкой выполняются условия полного сцепления. Для решения контактной задачи используется метод локализации [1]. Контактное взаимодействие рассматривается внутри круга, центром которого является индентор одного из уровней. Радиус круга определяется как:

$$A_m^2 = \frac{1}{\pi} \left(\sum_{j=1}^k \frac{k_{jm}}{\bar{N}_j} + \frac{1}{\bar{N}_m} \right), \quad (2)$$

здесь \bar{N}_j and \bar{N}_m — плотность инденторов уровней j и m , k_{jm} — число инденторов уровня j внутри круга с радиусом A_m . Вне круга действует постоянное номинальное давление \bar{p} :

$$\bar{p} = \sum_{j=1}^k \bar{N}_j \int \int_{\omega_j} p_j(r, \theta) r dr d\theta \quad (3)$$

Контактная задача решается пошагово, начиная с малых нагрузок, обеспечивающих контакт только инденторов первого уровня. В этом случае можно использовать метод решения периодических контактных задач для тел с покрытиями [2], основанный на интегральных преобразованиях Ханкеля и Фурье, методе граничных элементов и итерационной процедуре. Появление в контакте с увеличением нагрузки следующего уровня требует использования двойных итераций для учета эффекта взаимного влияния.

В качестве примера была исследована трехуровневая система сферических инденторов, расположенных в узлах гексогональной решетки. Был изучен эффект взаимного влияния на распределение контактного давления, а также проведен анализ зависимости внедрения системы инденторов от приложенной нагрузки для относительно жестких и относительно податливых покрытий разной толщины. Для относительно податливых покрытий также было изучено влияние коэффициента Пуассона материала покрытия на контактные характеристики.

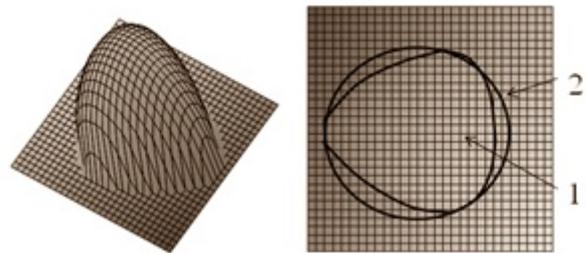


Рис. 1. Пример неосесимметричного распределения давления под сферическим индентором и площадка контакта (1), (2) — граница площадки контакта, полученная без учета взаимного влияния (случай относительно жесткого покрытия)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-01-00352)

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука. — 2001
2. Горячева И.Г., Торская Е.В. Периодическая контактная задача для системы штампов и упругого слоя, сцепленного с упругим основанием // Трение и износ. — 1995 (17), № 4, 642—652

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЯ ВЯЗКОЙ СМАЗКИ В ОПОРНОМ ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ДВИЖЕНИИ

П.П. Усов

Национальный исследовательский Университет «Московский институт электронной техники», Москва, Зеленоград, Россия; usovp@mail.ru

Теоретической основой расчета рабочих характеристик подшипников скольжения жидкостного трения являются решения упругогидродинамических (УГД) задач. Наибольшее внимание уделялось решению УГД задач применительно к подшипникам двигателей [1, 2].

В работе [3] рассмотрена УГД задача для опорного подшипника с тонким вкладышем, работающего в реверсивном режиме. Для определения деформаций вкладыша использовалась модель Винклера. Показано, что в момент времени, когда скорость близка к нулевому значению, толщина смазочного слоя может быть значительной, и близка к постоянному значению в области высокого давления.

В данной работе рассмотрена УГД задача для подшипника скольжения, работающего в реверсивном режиме, для случая, когда на характеристики смазочного слоя существенную роль играют деформации, как подшипника, так и цапфы. Для определения деформаций контактирующих тел используются известные решения плоских задач теории упругости для цилиндра и пространства с цилиндрическим вырезом.

В безразмерных переменных основные уравнения задачи имеют вид

$$h(\varphi, t) = 1 - \chi(t) \cos(\varphi - \theta(t)) + \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p(\xi, t) \left[\cos(\varphi - \xi) \ln \left| \sin \frac{\varphi - \xi}{2} \right| - \frac{1}{4} \right] d\xi,$$

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) - V_0 \cos t \frac{\partial(\rho h)}{\partial \varphi} = V_1 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t},$$

$$\rho = 1 + \frac{K_1 p}{1 + K_2 p}, \quad \mu = \exp(Qp),$$

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (p \cos \varphi - \tau \sin \varphi) d\varphi = W,$$

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (p \sin \varphi + \tau \cos \varphi) d\varphi = 0,$$

$$\tau = \psi \left(\frac{1}{6} V \exp(Qp) \frac{\cos t}{h} + \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right).$$

Здесь h — безразмерная толщина смазочного слоя, p — безразмерное давление, μ и ρ — безразмерные вязкость и плотность смазки, t — безразмерное время, χ — относительный эксцентриситет, θ — угол между линией нагрузки и линией центров, $V = \frac{48\mu_0 u_0 R^2 (1 - \nu^2)}{\Delta^3 E}$, E — приведенный модуль

упругости, $V_1 = \frac{192\pi\mu_0 R^3 (1 - \nu)}{\Delta^3 E T}$, T — период реверсивного движения.

Численный анализ данной системы уравнений показал, что толщина смазочного слоя как функции угловой координаты в моменты времени, когда скорость мала, имеет два минимума, расположенных у границ области высокого давления. Образовавшаяся при этом форма зазора с двумя сужениями у границ области высокого давления препятствует вытеканию смазки из него и способствует поддержанию высокого значения толщины смазочного слоя в области высокого давления. Для примера на рис. 1 приведены зависимости $h(\varphi)$ в различные моменты времени t .

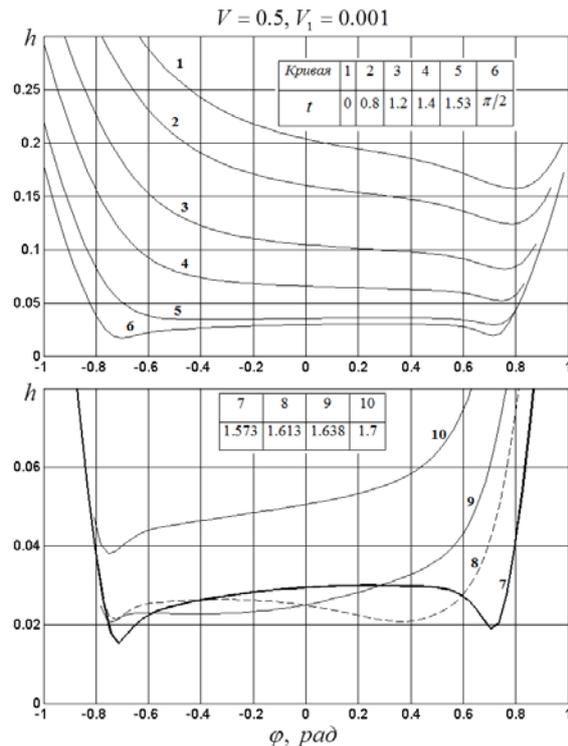


Рис. 1. Зависимости $h(\varphi)$ при различных значениях безразмерного времени t

1. Labouff G.A. and Booker J.F. Dynamically Loaded Journal Bearings: a Finite Element Treatment for Rigid and Elastic Surfaces // Trans. ASME. J. Lubr. Technol. — 1985 (107), 505—515
2. Bonneau D., Guines D., Freigne J., and Toplosky J. EHD Analysis, Including Structural Inertia Effects and a Massconserving Cavitation Model // Trans. ASME. J. Lubr. Technol. — 1995 (117), 540—54
3. Усов П. П. Численный анализ характеристик смазочного слоя в опорном подшипнике скольжения при реверсивном движении // Трение и износ. — 2016 (37), № 3, 269—279

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ УПОРНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

К.С. Ахвердиев, Е.О. Лагунова, К.С. Солоп

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия; lagunova@rambler.ru

Цель работы — формирование уточненных расчетных моделей упорных подшипников скольжения, работающих в режиме гидродинамического смазывания при учете зависимости вязкостных характеристик микрополярного смазочного материала (МСМ) от температуры, а также влияния адаптированного профиля опорной поверхности на основные рабочие характеристики подшипников, обеспечивающих необходимые инженерные проектировочные расчеты в достаточно широком диапазоне скоростей и нагрузок.

Постановка задачи. Рассматривается установившееся движение вязкого МСМ в зазоре упорного подшипника. Ползун с адаптированным профилем опорной поверхности неподвижен, а направляющая движется со скоростью u^* по направлению оси ox' . Предполагаем, что вязкостные характеристики микрополярной жидкости зависят от температуры по показательному закону:

$$\mu' = \mu_0 e^{-\beta T'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{-\beta T'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{-\beta T'}. \quad (1)$$

Уравнение контура ползуна и направляющей запишется в виде:

$$y' = 0, \quad y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha - a \sin \omega' x', \quad (2)$$

Исходные уравнения и граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + N^2 \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{1}{e^{-\beta T}} \frac{dp}{dx}, \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} &= \frac{v}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \psi = 0 \quad \text{при} \quad y = h(x) = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x;$$

$$u = 1, \quad v = 0, \quad \psi = 0, \quad \text{при} \quad y = 0, \quad \eta = \frac{l_1 \operatorname{tg} \alpha}{h_0}; \quad \eta = \frac{a}{h_0}; \quad (4)$$

$$p(x_1) = p(x_2) = 0;$$

Точное автомодельное решение системы (3) (усредненного 2 уравнения по толщине смазочного слоя) удовлетворяющее граничным условиям (4) будем искать в виде:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} + U(x, y), \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} + V(x, y),$$

$$V(x, y) = -v(\xi) h'_x, \quad U(x, y) = \tilde{u}(\xi), \quad \xi = y/h(x),$$

$$v = -(\xi^2 - \xi)/2N_1,$$

$$\psi(x, y) = \tilde{\psi}(\xi), \quad e^{\beta T} \frac{dp}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}'(\xi) &= \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad v = -\frac{1}{2N_1} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{C}_1 = 6 - \frac{N^2}{N_1}, \\ \tilde{u}(\xi) &= \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} + \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi^3}{3} - \frac{\xi^2}{2} \right) + \left(\frac{N^2}{12N_1} - \frac{\tilde{C}_1}{2} - 1 \right) \xi + 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения гидродинамического давления $\mu(x) \frac{dp}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}$ воспользуемся выражением скорости диссипации энергии. В результате получим:

$$p = \tilde{\mu} \left(6 - \frac{N^2}{N_1} \right) \left(\frac{\eta}{2} (x^2 - x_1^2) - \frac{2\eta_1}{\omega} \sin \frac{\omega(x+x_1)}{2} \sin \frac{\omega(x-x_1)}{2} - \frac{\eta}{2} (x_2 - x_1)(x - x_1) + \frac{2\eta_1(x-x_1)}{\omega(x_2-x_1)} \sin \frac{\omega(x_2+x_1)}{2} \sin \frac{\omega(x_2-x_1)}{2} \right).$$

Результаты численных расчетов приведены на рис. 2.

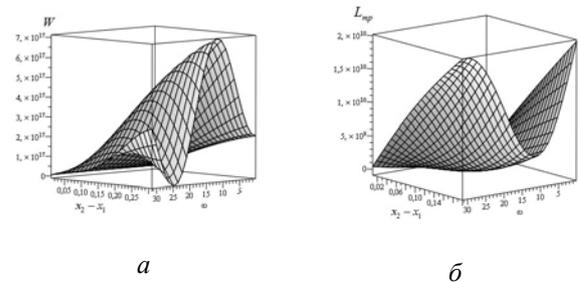


Рис. 2. Зависимость от параметра ω , характеризующего адаптированный профиль опорной поверхности, и от параметра $(x_2 - x_1)$, характеризующего протяженность свободной поверхности смазочного материала: а — несущая способность; б — сила трения

Основные рабочие характеристики подшипника существенно зависят от параметра ω , характеризующего адаптированный профиль опорной поверхности, от теплового параметра K , от экспериментального параметра β , обусловленного зависимостью вязкости от температуры T .

Разработка выполнена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» № 2210370/22.12.20016 на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ УПОРНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ РАБОТАЮЩЕГО НА ВЯЗКО-УПРУГО-ПЛАСТИЧНОМ СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

К.С. Ахвердиев, С.А. Солоп, К.С. Солоп¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщений, Ростов-на-Дону, Россия; solop.k.s@mail.ru

Цель работы

Уточнение расчетной модели упорного подшипника скольжения, работающего в режиме гидродинамического смазывания на вязко-упруго-пластичном смазочном материале, оценке влияния параметра пластичности и числа Дебора на силу трения и несущую способность.

Постановка задачи

Рассматривается установившееся движение вязко-упруго-пластичной смазки между наклонным ползуном и направляющей.

Исходные уравнения и граничные условия

Характеристики потока могут быть выражены уравнением:

$$\frac{\partial v'_x}{\partial y'} = \frac{\tau_0}{\mu} \operatorname{sh} \frac{\tau'}{\tau_0} + \frac{u^*}{G} \frac{\partial \tau'}{\partial x'}$$

где u^* — скорость движения направляющей, G — модуль упругости, μ — вязкость, $\lambda = \mu/G$ — характеризует время релаксации жидкости, τ_0 — предельное напряжение сдвига, τ' — касательное напряжение, t' — время релаксации, v'_x, v'_y — компоненты вектора скорости \vec{v} .

Равновесие элемента жидкости описывается уравнением:

$$\frac{\partial \tau'}{\partial y'} = \frac{dp'}{dx'}$$

После преобразований получим:

$$\frac{\partial^2 v'_x}{\partial y'^2} = \frac{\tau_0}{\mu h'} \left\{ \operatorname{sh} \left[\frac{1}{\tau_0} \left(\frac{dp'}{dx'} \cdot h' + c(x') \right) \right] - \operatorname{sh} \left[\frac{c(x')}{\tau_0} \right] \right\} + \frac{u^*}{G} \frac{d^2 p'}{dx'^2}$$

При анализе за исходное берем полученное уравнение и уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v'_y}{\partial y'} + \frac{\partial v'_x}{\partial x'} = 0$$

Переходя к безразмерным переменным, граничные условия возьмём в виде:

$$u = 0, v = -1 \text{ при } y = 0;$$

$$u = 0, v = 0 \text{ при } y = 1 + \gamma x = H(x), \gamma = \frac{l \operatorname{tg} \alpha}{h_0};$$

$$p = \frac{p_a}{p^*} \text{ при } x = 0, x = 1; p = 0, c = 0 \text{ при } x = 0.$$

Автомодельное решение задачи будем искать в виде:

$$v = \frac{\partial \psi}{\partial y} + V(x, y), \quad u = -\frac{\partial \psi}{\partial x} + U(x, y).$$

$$\frac{1}{AH} \left\{ \operatorname{sh} \left(AH \frac{dp}{dx} + A \frac{h_0}{l} c \right) - \operatorname{sh} \left(A \frac{h_0}{l} c \right) \right\} + \beta \frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{\tilde{C}_1}{H^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{H^3(x)},$$

$$\psi = \tilde{\psi}(\xi), \quad V = \tilde{v}(\xi), \quad U = \tilde{u}(\xi) \cdot H'_x,$$

$$\xi = \frac{y}{H(x)}, \quad H(x) = 1 + \gamma x.$$

После преобразований получим:

$$\tilde{\psi}' = \tilde{C}_2 \left(\frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi}{2} \right), \quad \tilde{v} = \tilde{C}_1 \cdot \frac{\xi^2}{2} + \left(1 - \frac{1}{2} \tilde{C}_1 \right) \xi - 1.$$

Безразмерное гидродинамическое давление p и функцию $c(x)$ ищем в виде рядов:

$$p = p(0) + p'(0) \cdot x + \frac{p''(0)}{2!} \cdot x^2 + \frac{p'''(0)}{3!} \cdot x^3 + \dots,$$

$$c = c(0) + c'(0) \cdot x + \frac{c''(0)}{2!} \cdot x^2 + \frac{c'''(0)}{3!} \cdot x^3 + \dots$$

В результате получены аналитические выражения для поддерживающей силы и силы трения, позволяющие оценить влияние числа Дебора β и параметра пластичности на эти характеристики.

Если смазочный материал является вязкопластичным, то несущая способность на 15% больше случая истинно вязкого смазочного материала.

Если смазочный материал обладает вязкоупруго-пластичными свойствами, то с увеличением параметра β^{-1} несущая способность увеличивается и при $\beta^{-1} \rightarrow \infty$ стремится к случаю истинно вязкопластичного смазочного материала, оставаясь больше этого значения.

Если смазочный материал вязкоупругий, то с увеличением параметра β^{-1} , сила трения подшипника, работающего в нестационарном режиме трения, увеличивается и при $\beta^{-1} \rightarrow \infty$ стремится к случаю, соответствующему истинно вязкому материалу, оставаясь при этом меньше этого значения.

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

Н.Ф. Дмитриченко, А.А. Миланенко, А.Н. Савчук, Ю.А. Турица

Национальный транспортный университет, Киев, Украина, yuliya_tur@ukr.net

Введение. Как известно, явление избирательного переноса, как отдельный вид фрикционного взаимодействия, возникает на поверхностях трения в результате протекания химических и физико-химических процессов, которые приводят к автокомпенсации износа и снижению трения. Избирательный перенос обеспечивает предохранение поверхности трения от окисления из-за образования сервопитной пленки, которая уменьшает трение и усиливает защиту поверхностей от износа [1]. Таким образом, обеспечивается более равномерное распределение нагрузки в контакте, исключая возможность реализации пластического деформирования. Такая пленка не наклёпывается и способна многократно деформироваться без разрушений, поскольку при отсутствии окисной пленки, дислокации в ней легко разряжаются [2].

Цель. Для установления возможного избирательного переноса в узлах гусеничных машин, имеющих триботехнические пары бронза-сталь, были проведены комплексные лабораторные испытания на машине трения СМЦ-2 в нестационарных условиях трения.

Методы и материалы. Испытания проводились в условиях пуск-остановка при максимальном контактном напряжении 700 МПа. Всего циклов в эксперименте проводилось $N = 550$, которое соответствовало непрерывной работе 80 мин. Использовались ролики из стали Ст40Х (твердость HRC = 40—44) и втулка из бронзы БрОЦС 4-4-17. Триботехнические пары смазывались нейтральным базовым маслом И-40А в чистом виде, имеющей минимальную вязкость, и смеси И-40А с базовым маслом МС-20 с различной концентрацией для получения масел более высокой вязкости.

Результаты и обсуждение. В нестационарном режиме трения за данное время испытаний регистрировалось формирование стабильной сервопитной пленки уже на начальной стадии избирательного переноса. Скорость скольжения при максимальном моменте трения достигало 0,27 м/с, и далее увеличивалась до 1,08 м/с; начальная объёмная температура масла соответствовала 25 °С. Анализ кинетики износа контактирующих пар показал, что наибольшая интенсивность износа как для Ст40Х, так и для БрОЦС 4-4-17 характерна для первых циклов нагружений, при $N \leq 100$.

Площадь стали, покрытая бронзой, уменьшалась по мере использования масла увеличенной вязкости (рис. 1) от минимального значения вязкости нейтрального масла И-40А.

Интенсивность износа стали, в условиях избирательного переноса уменьшалась более интенсивно для минимального значения вязкости нейтрального масла И-40А, особенно при $N \leq 150$. (рис. 2).

В условиях избирательного переноса антифрикционные свойства выше для минимального значения вязкости нейтрального масла И-40А в

начальный период наработки, но характерное снижение коэффициента трения от наработки наблюдалось независимо от величины её вязкости (рис. 3).

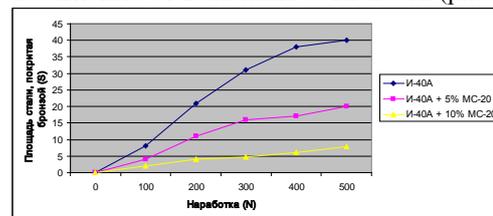


Рис. 1. Площадь стали, покрытая бронзой, в нестационарных условиях трения

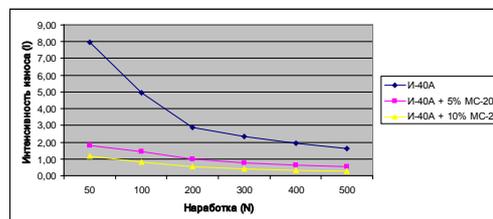


Рис. 2. Интенсивность износа в нестационарных условиях трения

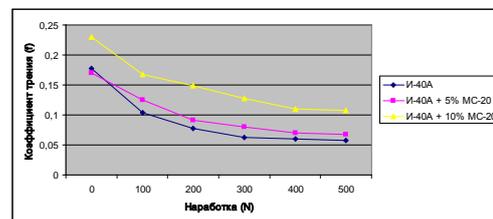


Рис. 3. Антифрикционные свойства в нестационарных условиях трения

Выводы. Экспериментально установлено явление избирательного переноса с образованием сервопитной пленки в нестационарных условиях трения при использовании нейтрального базового масла для триботехнической пары сталь-бронза. Кроме того, использование масла с минимальным значением вязкости приводит к интенсификации намазывания частиц износа бронзы по поверхности стали, увеличивая площадь стали, покрытую бронзой, и тем самым, уменьшая интенсивность износа. Также улучшаются антифрикционные свойства особенно в начальный период наработки при $N \leq 150$. Такое поведение сервопитной пленки, в начальный период наработки, мы объясняем снижением адгезионно-деформационной составляющей механизма трения и, таким образом, улучшением триботехнических характеристик в нестационарных условиях трения.

1. Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. Триботехніка та основи надійності машин. — К.: Інформавтодор. — 2006
2. Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Миланенко О.А., Савчук А.М., Турица Ю.О. Триботехнічні характеристики мастильних матеріалів в умовах експлуатації машин і механізмів: Монографія — К.: НТУ. — 2016

УПРУГАЯ ТВЕРДОСТЬ И КРИТЕРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.В. Измайлов¹, М.В. Новоселова¹, С.А. Чаплыгин²

¹Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия; iz2v@tvcom.ru

²ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, Россия

Введение. В механике и физике дискретного, в том числе фрикционного контакта технических поверхностей ключевую роль играют понятия фактической площади контакта A_r и, соответственно, фактическое контактное давление (ФКД) $p_r = N/A_r$, где N — нормальная нагрузка на контакт.

Целью данной работы является анализ методик расчета фактического контактного давления p_r с помощью численной модели дискретного контакта технических поверхностей. Основное внимание уделено упругому контакту, так как при пластическом контакте ФКД с достаточной точностью можно принять равной микротвердости менее твердой из контактирующих поверхностей.

Для анализа использована численная модель дискретного контакта, позволяющая рассчитывать основные его характеристики на основании микрогеометрии поверхностей и физико-механических свойств материалов контактирующих деталей [1].

Фактическое контактное давление. В условиях преимущественно упругой деформации на основании результатов моделирования контакта предлагается достаточно простая формула для расчетов ФКД:

$$p_r = K_B E^* \sqrt{\frac{R_p}{r_{cp}}} \cdot \left(\frac{p_n}{E^*}\right)^m, \quad (1)$$

где $K_B = 0,36 \pm 0,03$ — коэффициент; E^* — эквивалентный модуль упругости материалов контактирующих тел; R_p — наибольшая высота неровностей профиля над средней линией; r_{cp} — средний радиус вершин выступов шероховатости; p_n — номинальное давление; показатель степени $m \approx 0,1$.

Упругая твердость дискретного контакта. Как видно из формулы (1), ФКД слабо зависит от номинального давления. Это обстоятельство дает основание воспользоваться концепцией упругой твердости, предложенной авторами работы [2]. Суть этой концепции в том, что ФКД в упругом контакте считается не зависящим от номинального давления, как и ФКД в пластическом контакте, где оно равно обычной (пластической) твердости или микротвердости. В отличие от авторов работы [2], которые считали ФКД постоянным при любых номинальных давлениях, мы предлагаем считать ФКД постоянным в некотором диапазоне номинальных давлений. Это позволяет уменьшить погрешность, связанную с пренебрежением хотя и слабой, но существующей зависимости p_r от p_n (см. формулу (1)).

Согласно предлагаемой нами концепции упругой твердости, формула для ФКД имеет вид:

$$p_r = KE^* \sqrt{\frac{R_p}{r_{cp}}},$$

где коэффициент K выбирается по табл. 1 в зависимости от диапазона номинальных давлений.

Таблица 1. Значения коэффициента K для расчета упругой твердости

Диапазон номинальных давлений p_n , МПа	0,1÷1	1÷10	10÷100
Значения K	0,11±0,02	0,14±0,02	0,18±0,03

Критерий пластичности дискретного контакта. В работе [2] помимо концепции упругой твердости предложен критерий преимущественного механизма деформации контакта — так называемый индекс пластичности. На основании численной модели дискретного контакта нами предлагается критерий преимущественного характера деформации контакта, схожий по структуре с индексом пластичности Гринвуда и Вильямсона, но основанный на несколько иных предпосылках. Контакт считается преимущественно пластическим, если во всем диапазоне реальных значений номинального контактного давления число упруго деформированных выступов не более 5%, и преимущественно упругим, если это число не менее 95%.

Предлагаемый нами критерий имеет вид:

$$\Psi = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{R_p}{r_{cp}}}.$$

Контакт считается преимущественно упругим при $\Psi < 2$ и преимущественно пластическим при $\Psi > 60$.

Результаты численного моделирования подтверждают достоверность предложенного критерия.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00614а).

- Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». — 2014, № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf> (доступ свободный)
- Greenwood J.A. and Williamson J.B.P. Contact of Nominally Flat Surfaces // Proc. Roy. Soc. — 1966 (A295), no. 1442, 300—319

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В.В. Кузин, С.Ю. Федоров

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия; kuzena@post.ru

Цель

Изучение механизмов изменения исходной структуры керамики в условиях интенсивного фрикционного воздействия является актуальной научной задачей [1]. В работе исследован процесс трансформации структуры нитридной керамики на контактных площадках инструментов в условиях интенсивного фрикционного взаимодействия, характерного для высокоскоростного резания.

Материалы и методы

Эксперименты проводили при точении заготовок из чугунов и закаленных сталей резцами с режущими пластинами РКС22, свойства которых приведены в [2]. Состояние очагов износа исследовали на микроскопе Olympus BX51M. Для выявления изменений в структуре керамики применяли СЭМ TESCAN VEGA 3LMH. Тепловое состояние режущих пластин анализировали по методике [3].

Результаты и обсуждение

Установлено, что на контактных площадках режущих пластин РКС22 при высокоскоростной обработке изменяется структура керамики (рис. 1). На микрофотографии участка износа задней поверхности режущей пластины РКС22 видно, что поверхность участка износа h_3 сформирована двумя областями h_{31} и h_{32} , отличающихся структурой (рис. 1, а), с границей между ними в виде «ступеньки» (рис. 1, б).

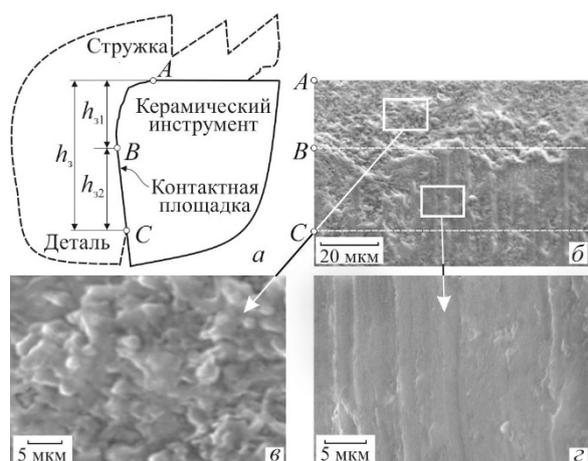


Рис. 1. Области с трансформированной структурой на участках режущих пластин из нитридной керамики

Структура поверхности керамики в области h_{31}

имеет мелкозернистый характер, причем зерна имеют сглаженную форму (рис. 1, б), что отличает эту структуру от исходной. Другим отличительным признаком новообразованной структуры является многочисленные структурные дефекты эксплуатационной природы. Эти дефекты, образовавшиеся на границах зерен, представлены несплошностями размером до 0,1 мкм и зародышевыми трещинами. Поверхность области h_{32} покрыта слоем аморфного материала толщиной менее 1 мкм со следами активного абразивного воздействия и многочисленными локальными очагами микроразрушений (рис. 1, в). На этой поверхности обнаружены отдельные трещины длиной до 10 мкм. Образование этих двух областей связано с разными условиями их контакта с заготовкой в условиях интенсивного фрикционного взаимодействия.

В условиях плотного контакта режущей пластины с обрабатываемым материалом и отсутствия доступа кислорода к зернам нитрида кремния в области h_{31} основным механизмом трансформации структуры керамики является появление и накопление эксплуатационных дефектов, зарождения и развития трещин. Завершающим этапом формирования новой структуры является отделение зерен и их конгломератов. Другие процессы протекают на участке дискретного контакта режущей пластины с обрабатываемым материалом в области h_{32} , куда способны проникать разные технологические среды, в том числе кислород. При этом процессы, протекающие в области h_{32} , предшествуют процессам, характерным для области h_{31} . Соотношение размеров областей h_{31} и h_{32} определяется тепловым состоянием режущих пластин, зависящим от скорости резания.

Благодарности. Настоящие исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (регистрационный номер проекта 9.1372.2017).

- Xiaobin Cui, Jun Zhao, Yonghui Zhou, and Guangming Zheng. Damage Mechanics Analysis of Failure Mechanisms for Ceramic Cutting Tools in Intermittent Turning // *European Journal of Mechanics A/Solids*. — 2013 (37), 139–149
- Кузин, В. В. Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов // *Вестник машиностроения*. — 2004. № 5, 39–43
- Верещака, А. С., Провоторов В. М., Кузин В.В. и др. Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью термондикаторных веществ // *Вестник машиностроения*. — 1986, № 1, 45–49

Трибомеханический анализ структурных изменений в поверхности высокоплотной керамики под воздействием вращающегося диска из закаленной стали

В.В. Кузин, С.Ю. Федоров

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия; kyzena@post.ru

Цель

Структурные изменения в поверхностном слое высокоплотной керамики при трении происходят под влиянием сложных процессов, определяемых условиями контакта с контртелом [1, 2]. Поэтому выявление влияния разных схем и режимов трения на структурные изменения в поверхности керамики является актуальной научно-технической задачей. В работе поставлена цель — выявить и проанализировать характер структурных изменений поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики на участках износа, сформированных под воздействием вращающегося диска из закаленной стали.

Материалы и методы

Исследования проводили на лабораторном стенде, реализующем схему трения «образец — вращающийся диск» [3]. Использовали диски из закаленной стали (52 HRC) диаметром 80 мм и толщиной 3 мм. Образцы располагали на стенде с учетом направления характерных рисок на их поверхности, образовавшихся при шлифовании. Структуру поверхности керамики изучали на микроскопе TESCAN VEGA 3LMH.

Результаты и обсуждение

Установлено, что при трении вращающегося диска из закаленной стали по поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики образуется участок износа со структурой, отличной от шлифованной поверхности. После шлифования на поверхности этой керамики имеются впадины и выступы, а также дефекты в виде трещин 1, областей локального разрушения 2 и пластически деформированный слой (ПДС) 3 толщиной до 1,5 мкм (рис. 1, а). Структура этого слоя отличается от исходной структуры керамики большей плотностью и меньшим размером зерен. На границе ПДС и поверхности с исходной структурой имеются трещины.

На этапе приработки контакт вращающегося диска со шлифованной поверхностью керамического образца происходит по вершинам выступов, образованных при шлифовании. За счет этого на поверхности керамики образуются налипцы стали, разрушение которых происходит с одновременным отслоением ПДС. Особую роль в этом процессе играют трещины, образовавшиеся при шлифовании. Частицы ПДС «отрываются» от поверхности керамики по границам трещин и «уносятся» из зоны трения вращающимся диском. В результате действия этого адгезионного механизма структурных изменений

поверхности высокоплотной керамики «вскрывается» ее исходная структура, сформированная при спекании. При дальнейшем трении структура «новой» керамики продолжает видоизменяться по механизму транскристаллитного разрушения поверхностных зернами. Взаимодействие стального диска происходит вершинам зерен исходной плотной структуры, которые скалываются с образованием плоских площадок 4. Зерна с наиболее выступающими вершинами вырываются из керамического каркаса по механизму межкристаллитного разрушения с образованием поверхностных пустот 5 (рис. 1, б). За счет действия этих трех конкурирующих механизмов формируется окончательная структура керамики на участке износа.

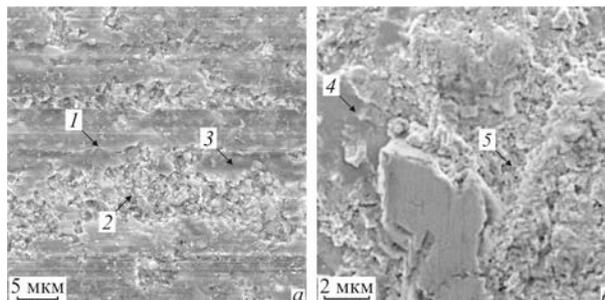


Рис. 1. Морфология поверхностей после шлифования (а) и трения (б)

Таким образом, в результате выполненных исследований вскрыта природа структурных изменений в поверхности керамики под воздействием вращающегося диска из закаленной стали.

Благодарности. Данные исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (регистрационный номер проекта 9.1372.2017).

1. Кузин В.В., Григорьев С.Н., Волосова М.А. Тепловые и деформационные процессы в поверхностном слое детали из оксидно-карбидной керамики, контактирующей с деталью из никелевого сплава, при нагреве // Новые огнеупоры. — 2014, № 4, 53—59
2. Penglao W., Tachai L., and Lohwongwatana B. Effect of Linear Sliding Speed on Wear Behavior of Al_2O_3 /TiC Ceramic Composite and Diamond Slicing Blade // Advanced Materials Research. — 2014 (1025—1026), 292—297
3. Кузин В.В., Федоров С.Ю., Селезнев А.Е. Влияние режимов алмазного шлифования на триботехнические характеристики керамики на основе оксида алюминия // Трение и износ. — 2016 (37), № 4, 475—481

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПЕРЕХОДА ОТ УПРУГОГО КОНТАКТА К УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМУ

М.М. Матлин¹, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия; matlin@vstu.ru

Цель

Исследования процесса деформации в контакте сферы с плоской поверхностью показывают необходимость рассмотрения контакта как непрерывно упругоупругопластического, что позволит исключить необходимость определения критериев перехода от упругого силового взаимодействия к упругопластическому. В связи с этим, целью работы является разработка и экспериментальная проверка единой расчетной зависимости для определения сближения в контакте сферы с плоской поверхностью, справедливая для упругого и упругопластического контактного взаимодействия.

Результаты исследования

В общем случае силового контакта поверхность сферы упругопластически сплющивается, а на поверхности детали одновременно образуется остаточный отпечаток. Полное сближение контактирующих тел определяется по формуле

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_y + h, \quad (1)$$

где $\alpha_{y,\Sigma}$ — обратимое упругое сближение деталей; h_{Φ} — остаточное сближение деталей.

Обратимая упругая часть $\alpha_{y,\Sigma}$ полного сближения в рассматриваемом случае может быть вычислена по формуле Г. Герца, с поправкой [1], учитывающей пластическую деформацию в контакте

$$\alpha_{y,\Sigma} = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 F^2 (k_1 + k_2)^2}{16R \left(1 + \frac{2h}{\alpha_{y,\Sigma}}\right)}}. \quad (2)$$

Для разработки методики расчета суммарной остаточной деформации была введена новая характеристика контактного взаимодействия — приведенная пластическая твердость [2]:

$$НД_{np} = \frac{1,5 \cdot НД_{ш} \cdot НД}{НД_{ш} + НД}. \quad (3)$$

Зависимость для определения суммарной величины остаточной деформации, справедливая для общего случая контактного взаимодействия, когда материалы сферы и детали деформируются упругоупругопластически одновременно [1]:

$$h_{\Sigma} = aR \cdot \left(\frac{F - F_0}{НД_{np} \cdot R^2} \right)^b, \quad (4)$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от соотношения твердостей сферы и детали $НД_{ш}/НД$.

Подставив (4) и (2) в (1), получили формулу для определения полного сближения α_{Σ} :

$$\alpha_{\Sigma} = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 F^2 (k_1 + k_2)^2}{16R \left(1 + \frac{2h_{\Sigma}}{\alpha_{y,\Sigma}}\right)}} + aR \cdot \left(\frac{F - F_0}{НД_{np} \cdot R^2} \right)^b. \quad (5)$$

Экспериментальная проверка

В таблице 1 приведено сравнение значений полного сближения в контакте сферы ($R = 5$ мм, $НД = 11205$ МПа, что соответствует твердости $HRC 65$) с плоской поверхностью деталей различной твердости, рассчитанных по формуле (5), с экспериментальными значениями. Наибольшая разница расчетных и опытных значений полного сближения с вероятностью 95% не превышает 6%.

Таблица 1. Сравнение значений полного сближения α_{Σ} , рассчитанного по формуле (5), и полученных экспериментально

Материал	Нагрузка F , Н	Полное сближение (ф. 5) α_{Σ} , мкм	Экспериментальные значения α_{Σ} , мкм	Расхождение, %
сталь 30ХГСА, $НД=11400$ МПа	200	7,15	7,23	-1,12
	600	15,05	15,01	0,27
	2000	34,44	34,14	0,87
	6000	74,91	76,19	-1,71
сталь 30ХГСА, $НД=10915$ МПа	200	7,15	7,62	-6,57
	600	15,07	14,91	1,06
	2000	34,51	34,14	1,07
	6000	75,15	72,05	4,13
сталь 30ХГСА, $НД=6500$ МПа	200	7,34	7,25	1,23
	600	15,65	16,45	-5,11
	2000	36,54	36,71	-0,47
	6000	81,4	80,9	0,61

Заключение. Получена и экспериментально подтверждена единая аналитическая зависимость для определения полного сближения в контакте сферы с плоской поверхностью детали, справедливая как в условиях чисто упругой, так и упругопластической деформации.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00350.

- Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Жёсткость упругопластического контакта деталей машин: монография. — М.: Машиностроение. — 2015
- Пат. 2581746 РФ, МПК G01N3/08. Способ определения коэффициента нормальной жесткости упругопластического контакта деталей двойной кривизны / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин; ВолГТУ. — 2016

ДЕМПФЕР С ПОРИСТЫМ АНИЗОТРОПНЫМ КОЛЬЦОМ

А.М Мукутадзе

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия; mykyt@yandex.ru

Цель работы

Разработка уточненных расчетных моделей демпферов с пористым покрытием для компенсации дисбаланса в опорах с подшипниками качения с учетом способа подачи смазочного материала и анизотропии пористого слоя в условиях стационарного и нестационарного движения вала.

Постановка задачи

Рассматривается демпфер с обоймой из пористого материала с масляной пленкой между ней и наружным кольцом подшипника качения. Задачу решаем с учетом анизотропии проницаемости пористого слоя и принудительной подачи смазочного материала в радиальном и осевом направлениях. В подобной конструкции демпфера пористая втулка запрессована в стальной непроницаемый корпус.

При решении используется аналогия в условиях работы демпфера и радиального подшипника скольжения с пористой втулкой.

В работе на основе уравнений Дарси, определяющих течение смазочного материала в пористых слоях, и модифицированного уравнения Рейнольдса решается задача о неустановившемся движении вязкого несжимаемого смазочного материала в зазоре пористого демпфера. Рассматривается случай, когда принудительная подача смазочного материала производится в окружном и радиальном направлениях с учетом влияния ортогональной анизотропии пористого слоя.

В результате решения поставленной задачи найдено поле давлений в пористом и смазочном слоях, получены аналитические зависимости для усилий в масляной пленке. Кроме того, используется уравнение движения ротора для нестационарного движения центра вала в осевом и радиальном направлениях.

Уравнения, описывающие нестационарное движение вала, решались численным методом, предложенным Гиром. Интегралы в этих уравнениях вычислялись методом Гаусса.

Для определения модуля передаваемого усилия

$$|F_{тр}| = \sqrt{(F_{\xi} - Ke)^2 + F_{\eta}^2} \text{ и коэффициента передачи}$$

$$T_r = \frac{|F_{тр}|}{i\omega^2} = \frac{\sqrt{(F_{\xi} - Ke)^2 + F_{\eta}^2}}{i\omega^2} \text{ подставляем полученные}$$

значения усилий масляной пленки F_{ξ} и F_{η} .

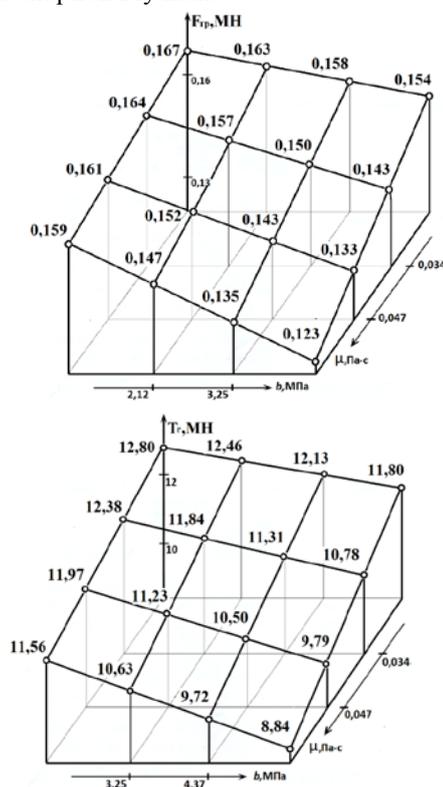
По результатам численных расчетов построены графики, численный анализ которых показывает:

1. Демпферы описанной конструкции обеспечивают значительное снижение влияния колебаний

рабочих нагрузок и дисбаланса вала на опорные подшипники качения.

2. Полученные результаты показывают, что демпферы с пористым анизотропным покрытием наружного кольца и сжимаемым масляным слоем обеспечивают благодаря коэффициенту передачи значительное снижение отрицательного влияния вибраций на радиальные подшипники качения.

3. Кроме того, отмечено, что последовательная принудительная подача смазочного материала в осевом и радиальном направлениях обеспечивает более устойчивую работу как демпферов, так и радиальных подшипников с пористым покрытием или пористой опорной втулкой.



Нестационарное движение вала, неполное заполнение рабочего зазора и принудительная подача смазочного материала в радиальном направлении

Заключение

На основе выполненных расчетов установлено, что в исследованной области параметров рассматриваемые демпферы с пористым наружным кольцом при принудительной подаче смазочного материала в радиальном и осевом направлениях и учете в моделях проницаемости пористого слоя эффективно ослабляют передаваемые усилия дисбаланса.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ, ПРОНИЦАЕМОСТИ И ВЯЗКОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ОТ ДАВЛЕНИЯ

М.А. Мукутадзе¹, А.Н. Гармония

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, opatskih@yandex.ru

Цель работы

Заключается в линейной постановке задачи при разработке расчетной модели бесконечного радиального подшипника с пористым покрытием на поверхности шейки вала, учете зависимости вязкости, проницаемости и электропроводности смазочного материала от давления и последующем асимптотическом решении с учетом сил инерции.

Постановка задачи

Рассматривается установившееся движение вязкого несжимаемого электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника с пористым покрытием на поверхности шейки вала в условиях действия внешнего электромагнитного поля. Вал вращается с угловой скоростью Ω , а подшипниковая втулка неподвижна.

Исходные уравнения и граничные условия

Движение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре описывается уравнением течения несжимаемой жидкости, уравнением неразрывности и уравнением Дарси

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta} e^{-\beta p} - A + Nv + e^{-\beta p} \operatorname{Re} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{dv}{d\theta} \right),$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial^2 P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0, \quad (1)$$

Соответствующими этим уравнениям граничными условиями:

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta, \quad (2)$$

$$u|_{r=0} = M \frac{\partial P}{\partial r^*} \left(r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} \right) v|_{r=0} = 1, \quad p = P|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}$$

$$\frac{\partial P}{\partial r^*} \left(r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1 \right) = 0, \quad p(0) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}.$$

Решение задачи, когда $\operatorname{Re} = 0$ ищем в виде:

$$v = \frac{\partial \Psi}{\partial r} + V(r, \theta), \quad u = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} + U(r, \theta), \quad \Psi = \tilde{\Psi}(\xi),$$

$$V = \tilde{r}(\xi), \quad U(r, \theta) = \tilde{u}(\xi) h'(\theta), \quad \xi = r/h(\theta), \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} e^{-\beta p} - A + N = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}, \quad h(\theta) = 1 + \eta \cos \theta.$$

Подставляя (3) в уравнение (1) с учетом граничных условий (2), получим:

$$\tilde{v} = \tilde{C}_1 \xi^2 / 2 - (\tilde{C}_1 / 2 + 1) \xi + 1, \quad \tilde{\Psi}' = \tilde{C}_2 / 2 (\xi^2 - \xi).$$

$$p = \frac{P_g}{p^*} + \left[1 + \beta p_g / p^* - \beta^2 p_g^2 / 2 p^* \right] \eta \sin \theta (\tilde{C}_1 + 3(A - N)).$$

Для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения получим выражение:

$$R_y = \eta \pi \left(1 + \beta p_g / p^* - \beta^2 p_g^2 / 2 p^* \right) (\tilde{C}_1 + 3(A - N))$$

$$L_{TP} = \mu_0 \Omega r_0 \pi \delta^{-1} \left(1 + \beta p_g / p^* - \beta^2 p_g^2 / 2 p^* \right) (A - N - 2).$$

При $\operatorname{Re} \neq 0$ решение задачи находим по степеням η

$$u = \sum_{k=0}^{\infty} u_k \eta^k, \quad v = \sum_{k=0}^{\infty} v_k \eta^k, \quad p = \sum_{k=0}^{\infty} p_k \eta^k.$$

В результате задачи для первого и второго приближения для составляющих поддерживающей силы и силы трения будем иметь:

$$R_x = \mu_0 \Omega r^3 \eta \pi (D_2 + \eta C) \delta^{-2} \quad R_y = \mu_0 \Omega r^3 \eta \pi (D_2 + \eta A) \delta^{-2}$$

$$L_{TP} = \frac{\mu_0 \Omega r \pi}{\delta} \left(1 + \beta p_g / p^* - \beta^2 p_g^2 / 2 p^* \right) [N + A + 2\eta^2 R_5'(r)].$$

Численный анализ полученных моделей позволил установить следующее:

Показан значительный вклад инерционных сил в величину основных триботехнических параметров рассматриваемых радиальных подшипников.

Установлено значительное повышение несущей способности при росте параметра β , характеризующего зависимость вязкости от давления, с выраженным максимумом при значении $\beta = 0,5$, и некоторая существенная зависимость от параметра A и N .

Доказано, что сила трения увеличивается по закону, близкому линейному, с ростом параметра β , причем с ростом инерционных сил этот рост более чем в 2 раза интенсивнее.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА, СМАЗЫВАЕМОГО РАСПЛАВОМ ЛЕГКОПЛАВКОГО ПОКРЫТИЯ

М.А. Мукутадзе¹, Е.О. Лагунова, В.В. Василенко

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия,
murman1963@yandex.ru

Цель работы

Формирование уточненной расчетной модели радиального подшипника, работающего в режиме гидродинамического смазывания на собственном расплаве, а также оценка влияния параметра, обусловленного расплавом подшипниковой втулки, обеспечивающим опорам скольжения аномально низкий коэффициент трения.

Постановка задачи

Рассматривается модель установившегося движения вязкого несжимаемого смазочного материала в зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения, покрытого расплавом легкоплавкого покрытия.

Рассматриваются условия, когда все тепло, выделяющееся в смазочной пленке, идет на плавление поверхностью материала подшипниковой втулки.

Исходные уравнения и граничные условия

Движение смазочного материала описывается уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении «для тонкого слоя» и уравнением неразрывности.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0.$$

Для определения функции $\lambda'f(\theta)$, обусловленной расплавленной поверхностью подшипника, воспользуемся формулой скорости диссипаций энергии.

$$\frac{d\lambda'f(\theta)}{d\theta} = K \int_{-\eta_1 f(\theta)}^{1-\eta \cos \theta} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 dr, \quad K = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{\delta L'}$$

с соответствующими этим уравнениям граничными условиями:

$$\begin{aligned} v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta; \\ v &= 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0 - \eta_1 f(\theta); \\ p(0) &= p(2\pi) = 0; \quad \eta = \frac{e}{\delta}; \quad \eta_1 = \frac{\lambda'}{\delta}. \end{aligned}$$

В качестве малого параметра принимая K , обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии, будем искать функцию $f(\theta)$ в виде:

$$\eta_1 f(\theta) = -\eta_1 f_0(\theta) - K \eta_1 f_1(\theta) - K^2 \eta_1 f_2(\theta) - \dots = f_0(\theta) - H.$$

Асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений будем искать в виде рядов по степеням малого параметра K :

$$v = v_0(r, \theta) + K v_1(r, \theta) + K^2 v_2(r, \theta) + \dots$$

$$u = u_0(r, \theta) + K u_1(r, \theta) + K^2 u_2(r, \theta) + \dots$$

$$\eta_1 f(\theta) = 0 - K \eta_1 f_0(\theta) - K^2 \eta_1 f_1(\theta) - K^3 \eta_1 f_2(\theta) - \dots$$

$$p = p_0 + K p_1(\theta) + K^2 p_2(\theta) + K^3 p_3(\theta) \dots$$

Выполняя точное автомодельное решение задачи при нулевом приближении, для безразмерного гидродинамического давления получим:

$$p_0 = \tilde{C}_1 J_2(\theta) + \tilde{C}_2 J_3(\theta) = 6\tilde{\eta} \sin \theta,$$

Решая уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости для первого приближения с учетом граничных условий, для p_1 получим:

$$p_1 = -\tilde{\eta} \sin \theta.$$

Для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения получим:

$$R_y = \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} (p_0 + K p_1) \sin \theta d\theta = \frac{\mu \Omega r_0^3 \tilde{\eta} \pi}{\delta^2} (6 - K);$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\partial v_0}{\partial r} \Big|_{r=0} + K \frac{\partial v_1}{\partial r} \Big|_{r=0} \right] d\theta = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta} \left[2\pi(1 - \eta_1 f(\theta)) + K(2\pi(1 - \eta_1 f(\theta)) + 2\pi^2(1 - 3\eta_1 f(\theta))) \right].$$

Численный анализ полученных моделей позволил установить следующее:

– сила трения уменьшается с ростом параметра K , характеризующего скорость диссипации механической энергии, и параметра $\eta_1 f(\theta)$, определяющего толщину пленки расплавленного материала, причем параметр K влияет на рост силы трения в 6,5 раза интенсивнее параметра $\eta_1 f(\theta)$;

– несущая способность упорного подшипника уменьшается с ростом параметра K и интенсивно увеличивается с ростом параметра $\tilde{\eta}$.

Зависимость силы трения $L_{\text{тр}}$ от толщины расплавленной пленки $\eta_1 f(\theta)$ близка линейной в пределах 0,001...0,004.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ

П.И. Маленко, А.Ю. Леонов, К.Д. Релмасира

Тульский государственный университет, Тула, Россия; malenko@tsu.tula.ru

Проблема структурно-фазовых изменений в поверхностной зоне пар трения скольжения со смазкой является недостаточно изученной. Данное обстоятельство отчасти объясняется тем, что большинство подобных пар трения (подшипники скольжения) эксплуатируются при температурах $T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть в отсутствие кипения смазки. В то же время для ряда изделий в силу специфики их эксплуатации характерен неконтролируемый температурный режим. К подобным механизмам относятся узлы автоматики стрелково-пушечного вооружения, к примеру, запорные агрегаты. Высокая скорострельность изделий в сочетании с автоматическим режимом стрельбы приводит к возникновению в поверхностной зоне температур, намного превышающих температуру кипения смазки $T_{\text{кип}} \approx 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температурный режим носит нестационарный характер [1]. В поверхностной зоне происходят структурно-фазовые превращения с одновременным изменением физико-механических и технологических свойств [2].

С целью обеспечения ресурса запорных агрегатов материалом для их изготовления служит теплоустойчивая сталь 25Х3МЗНБЦА, на рабочие поверхности деталей наносится упрочняющее карбонитридное покрытие (процесс нитрирования). Структура и изменения объемного содержания карбонитридных фаз приведены на рис. 1. «Белая» зона на рис. 1, а — это карбонитридное покрытие толщиной 10...15 мкм. Помимо карбонитридных фаз в диффузионной зоне также располагаются фазы Mo_2C , Fe_2P , FeSi , FeS_2 .

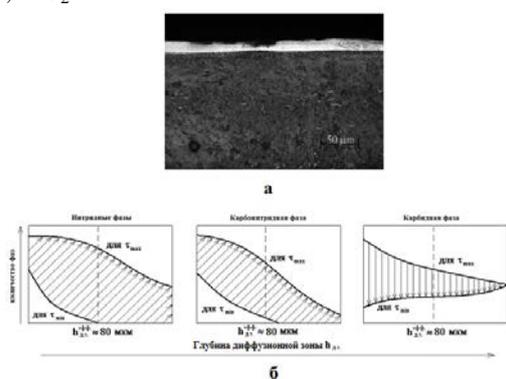


Рис. 1. Структура (а) и кинетическая схема (б) фазообразования в диффузионных зонах нитрированных конструкционных сталей

Проведенные экспериментальные исследования на машине трения, имитирующие работу запорного узла в различных температурных зонах, показали, что имеет место изменение исходного фазового состава поверхностной зоны (рис. 2).

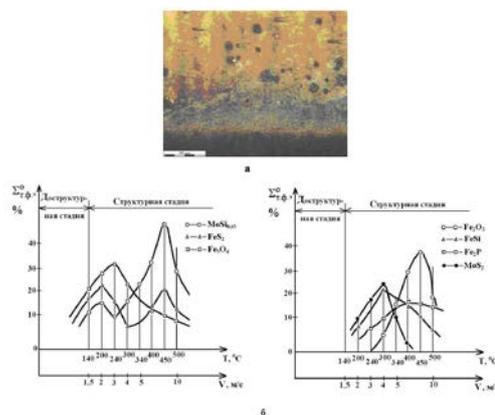


Рис. 2. Микроструктура поверхностных слоев (а) и изменение объемного содержания вторичных фаз (б) в различных температурных зонах нитрированной стали 25Х3МЗНБЦА

Полностью исчезает «белая» зона (рис. 2, а) с образованием в диффузионной зоне вторичных структур (рис. 2, б), которые состоят из оксидов Fe (Fe_3O_4 , Fe_2O_3), фосфида Fe (Fe_2P), силицидов (FeSi , $\text{MoSi}_{0,65}$) и сульфидов (FeS_2 , MoS_2). Объяснение подобных фазовых изменений в поверхностной зоне следует искать в протекании в ней диффузионных процессов, приводящих к распаду исходных фаз и образованию вторичных структур.

Возможно выделить четыре механизма их образования: 1) $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \text{FeO}$, $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \text{FeS}_2$, $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{P}$, $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \text{FeSi}$; 2) $\gamma'\text{-Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$; 3) $\varepsilon\text{-Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$; 4) $\text{Mo} \rightarrow \text{MoS}_2$, $\text{Mo} \rightarrow \text{MoSi}_{0,65}$.

Анализ рентгеноструктурных данных показал, что структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях имеют свои особенности:

- изменение диаграммы изотермических превращений «температура—процентное содержание элементов» для двойных сплавов в результате смещения линий кинетических кривых превращений в сторону пониженных температур;
- аномально высокая скорость диффузионного переноса в направлении поверхности трения, то есть против температурного градиента.

Объяснить причины возникновения подобных особенностей только на основе экспериментальных данных не представляется возможным. Необходимы дополнительные исследования, основанные на использовании положений тепловой задачи трения.

Объяснить причины возникновения подобных особенностей только на основе экспериментальных данных не представляется возможным. Необходимы дополнительные исследования, основанные на использовании положений тепловой задачи трения.

1. Маленко П. И., Зеленко В. К., Левин Д. М. Температурные поля и эксплуатационные свойства пар трения скольжения со смазочным материалом. — М.: Машиностроение. — 2011
2. Любарский И. М., Палатник Л. С. Металлофизика трения. — М.: Металлургия. — 1976

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 3

Технологии и применение полимерных и композиционных материалов

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
ПОЛУКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕРМОПЛАСТОВВ.В. Клубович¹, В.В. Рубаник¹, В.Ф. Луцко¹, А.А. Казьмин², О.С. Попова¹¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь

Введение. Характерной особенностью ультразвуковой сварки полукристаллических термопластов из-за их низкого модуля упругости ($E < 2 \cdot 10^3$ МПа) и большого коэффициента затухания ультразвуковых колебаний является значительное тепловыделение не только на границе раздела свариваемых материалов, но и в объемах, прилегающих к излучателю. Это приводит к существенной деформации поверхностей свариваемых деталей. Решить эту задачу можно путем проектирования оборудования и самого изделия, позволяющих сконцентрировать и уменьшить полную энергию, и, таким образом, снизить время сварки и уменьшить вероятность появления следа от вибрирующего излучателя на контактной поверхности. Таким образом, развитие и образование сварного соединения может быть интенсифицировано за счет создания искусственных концентраторов напряжений. Традиционно, при производстве изделий из пластмассы концентраторы напряжения формируются на соединяемых поверхностях в виде треугольных, полукруглых или прямоугольных выступов. Их морфология, размер и конфигурация определяют качество сварного шва [1].

Цель. Эта работа представляет экспериментальное исследование влияния положения концентраторов энергии относительно направления ввода УЗ колебаний на прочностные характеристики сварного шва с целью минимизации энергии, подводимой к свариваемому изделию.

Материалы и методы. В исследовании использовалась установка для ультразвуковой сварки изделий из термопластичных полимеров мощностью 1,2 кВт с рабочей частотой 20 кГц [2]. Объектом сварки являлись образцы в виде дисков из полипропилена диаметром 27 мм и толщиной 0,7 мм и такие же по размеру диски, но со сформованным по их периметру диаметром 24 мм треугольным выступом высотой 0,7 мм и углом при вершине 60° , в качестве концентратора энергии.

Результаты и обсуждение. Сварку образцов проводили по схеме (рис. 1), когда ультразвуковые колебания от излучателя передавались в зону контакта через образец с концентраторами энергии (рис. 1, а), и чрез образец без выступа (рис. 1, б). Сварка осуществлялась с усилием прижатия излучателя к свариваемым образцам 154 Н и амплитудой колебаний рабочего торца излучателя 55 мкм. Величина времени выдержки под усилием прижатия при затвердевании составляла 1,0 с.

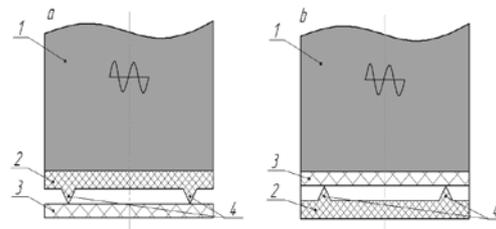


Рис. 1 Схема ультразвуковой сварки с расположением концентратора энергии на верхнем (а) и нижнем (б) образце: 1 — излучатель, 2 — образец с концентратором энергии, 3 — образец без концентратора энергии

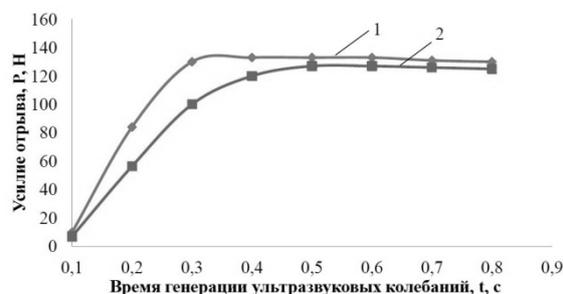


Рис. 2 Зависимость усилия отрыва сваренных образцов от времени генерации ультразвуковых колебаний: 1 — по схеме а (рис. 1), 2 — по схеме б (рис. 1)

Как видно (рис. 2), при одинаковом времени генерации ультразвуковых колебаний в интервале от 0,1 до 0,4 с более высокое усилие отрыва соответствует схеме передаче ультразвуковой энергии в зону контакта через образец с концентраторами энергии. В этом случае величина энергии необходимая для достижения максимальной прочности составляет 360 Вт·с. Во втором случае, когда колебания в зону контакта передаются через образец без треугольного выступа эта энергия равна 600 Вт·с. Очевидно, что вариант с передачей ультразвуковых колебаний в зону сварки через образец с концентратором энергии требует значительно меньших энергетических затрат, и как следствие возрастает производительность процесса и уменьшается вероятность появления следа от вибрирующего излучателя на контактной поверхности.

- Zhang Z., Xiaodong W., Yi L., Zhenqiang Z., and Liding W. Study on Heating Process of Ultrasonic Welding for Thermoplastics // J. Thermoplast. Compos. — 2010, 23(5):647-64
- Рубаник В.В., Луцко В.Ф., Шрубиков С.Н., Попова О.С., Шурмелевич Д.Д. Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных материалов // Поликомтриб-2015: Тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2015

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОФИЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ СТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

А.М. Валенков, В.В. Тимошенко

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Необходимым условием создания композиционных материалов является не только максимально однородное распределение частиц наполнителя в объеме полимерной матрицы, но и реализация их химического взаимодействия. Одним из наиболее широко применяемых наполнителей, являются частицы структурированного углерода (ЧСУ), однако склонность таких частиц к агрегации из-за высокой поверхностной энергии и большого отношения длины к диаметру препятствует образованию устойчивых дисперсий в различных средах, включая расплавы полимеров. Поэтому в настоящее время ведется интенсивный поиск эффективных методов модифицирования ЧСУ для снижения их поверхностной энергии, и уменьшения ван-дер-ваальсового взаимодействия между частицами, что будет способствовать дезагрегации частиц наполнителя и, как следствие, улучшению их взаимодействия с полимерной матрицей [1].

Цель — исследование эффективности модифицирования кислородсодержащими группами поверхности частиц структурированного углерода электрохимическим способом.

Материалы и методы

Для исследования использовали частицы структурированного углерода ТУ ВУ 690654933.001-2011, полученные в плазме высоковольтного разряда атмосферного давления, по способу описанного в [2]. Модифицирование поверхности частиц структурированного углерода осуществляли электрохимическим способом с помощью лабораторной установки (рис. 1).

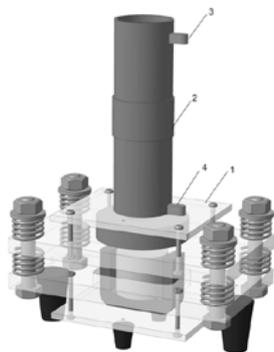


Рис. 1. Лабораторная установка для электрохимической обработки ЧСУ: 1 — платформа для виброуплотнения ЧСУ; 2 — корпус электрохимической ячейки с полисульфоновой мембраной; 3 — токоотвод катода; 4 — токоотвод анода

Конструкционная особенность установки, заключается в применении системы «суспензионного электрода», что обеспечивает отсутствие необходимости плунжерной или поршневой подпрессовки обрабатываемого материала. При этом электрохимические процессы протекают не только на аноде, но и на всей поверхности углеродных частиц. В качестве электролитов, из многочисленных неорганических окислителей выбраны наиболее применяемые для анодного окисления графита и других углеродных материалов (растворы бихромата калия, азотной кислоты и хромовая смесь) [3]. Качественный анализ функциональных групп на поверхности ЧСУ осуществляли на ИК-спектрометре с Фурье преобразованием NEXUS E.S.P. (Thermo Nicolet). Количественно функциональные группы определяли хемосорбционным методом с помощью иономера И-160.1-МП, оснащенного автотитратором.

Результаты и обсуждение

Установлено, что при электрохимической обработке поверхности ЧСУ, использование 3 М раствора азотной кислоты является наиболее эффективным. Количество гидроксильных и карбоксильных групп в обрабатываемом материале составляет в среднем $10 \pm 0,5$ и $5 \pm 0,025$ мас.% соответственно, что на 17 и 46% выше значений, полученных при обработке ЧСУ смесью 7 М растворов $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ в объемных соотношениях 2:1 соответственно. Таким образом, электрохимическое модифицирование ЧСУ (по сравнению с химическим) позволяет повысить степень функционализации углеродной поверхности частиц наполнителя преимущественно карбоксильными группами при использовании менее концентрированных растворов азотной кислоты и сокращении времени обработки в 6 раз.

1. Бадамшина Э.Р., Гафурова М.П., Эстрин Я.И. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием // Успехи химии. — 2010 (79), № 11, 1027—1064
2. Способ получения углеродного наноматериала: пат. 10010 Респ. Беларусь, МПК 2006 D01F 9/12, C01B 31/00, B82B 3/00 / С.А. Жданок, А.П. Солнцев, А.В. Крауклис, И.Ф. Буяков; дата публ.: 30.12.06.
3. Ярошенко А.П., Попов А.Ф., Шапранов В.В. Технологические аспекты синтеза солей графита // Журн. приклад. химии. — 1994 (67), № 2, 204—211

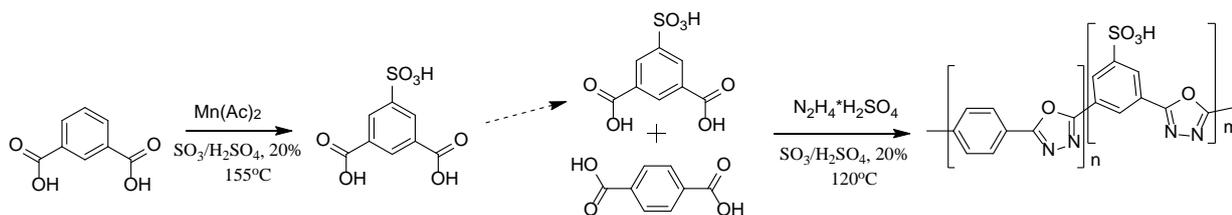
«ONE-POT» СИНТЕЗ СУЛЬФИРОВАННЫХ ПОЛИ-1,3,4-ОКСАДИАЗОЛОВ НА ОСНОВЕ ФТАЛЕВЫХ КИСЛОТ

В.С. Яценко, П. Р. Солтанмурадов, В.К. Ольховик

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; yashchenko-vladimir@tut.by

Быстро развивающееся направление экологичной энергетики на основе твердополимерных топливных элементов привело к интенсификации смежных исследований, направленных на получение дешевых и надежных полимерных протонпроводящих мембран. Наибольший интерес представляют полимерные электролиты, в которых протогенные

группы ковалентно связаны с макромолекулами полимера. Такие материалы обычно получают либо соответствующей обработкой (сульфированием или фосфорилированием) готовых высокомолекулярных соединений, либо полимеризацией мономеров, содержащих сульфо- и фосфоновые группы [1].



Начиная с 2000-х годов, ведется активный поиск альтернативы дорогостоящим фторированным протонпроводящим мембранам «Nafion®» фирмы «DuPont». В качестве наиболее перспективных полимерных электролитов рассматривают сульфированные ароматические конденсационные полимеры — поли(ариленаэфирсульфоны) [2], поли(ариленаэфиркетоны) [3], полиимиды [4] — которые дешевле перфторированных, характеризуются высоким водопоглощением в широком интервале температур и обладают высокой термостабильностью.

К поликонденсационным полимерам относятся и поли-1,3,4-оксадиазолы (ПОД), имеющие высокую химическую и термическую стабильность, а также высокую температуру стеклования

Учитывая тот факт, что единственное в мире действующее производство поли-*para*-фенилен-1,3,4-оксадиазола реализовано по олеумной технологии на ОАО «СветлогорскХимволокно» (Беларусь), разработка методов синтеза новых ПОД-полимеров проводилась с учетом особенностей олеумной технологии. С целью получения новых ПОД-полимеров, обладающих ионообменными свойствами, был разработан «one-pot» метод синтеза сополимеров поли-1,3,4-оксадиазола, содержащих в полимерной цепи *n*-фениленовые и 5-сульфо-*m*-фениленовые фрагменты. Оказалось, что использование ацетата марганца в качестве катализатора, в концентрациях 0,05—0,1% от массы реагента позволяет сульфировать изофталевую кислоту в олеуме при температуре 155 °С и получать 5-сульфо-изофталевую кислоту. Так как реакция получения поли-1,3,4-оксадиазола проводится в олеуме, то это позволило без выделения сульфированной дикислоты осуществить последующий синтез ПОД-сополимеров добавив к

раствору необходимое количество терефталевой кислоты и гидразин сульфата.

По предложенной методике была синтезирована серия новых сополимеров поли-1,3,4-оксадиазола, содержащих в макромолекулярной цепи *n*-фениленовый и сульфо-*m*-фениленовый фрагменты, в четко контролируемых пропорциях. Для сравнения в качестве контроля использовался гомополимер на основе терефталевой кислоты. Состав полученных ПОД-сополимеров был доказан методами ИК, ЯМР-спектроскопии и данными элементного анализа.

Показано, что увеличением содержания сульфированного фрагмента в полимерной цепи ПОД-сополимеров наблюдается пропорциональный рост ионообменной емкости и влагопоглощения, значение которых достигает 1,35 ммоль/г и 90 мас.% соответственно. Также все сополимеры сохраняют высокую термостойкость.

Таким образом, полученные сульфированные ПОД-сополимеры могут представлять интерес в качестве материала протонпроводящих мембран для твердополимерных топливных элементов.

1. Иванёв С.С., Мякин С.В. Полимерные мембраны для топливных элементов: получение, структура, модифицирование, свойства // Успехи химии — 2010 (79), 117—134
2. Li L. and Wang Y. Sulfonated Polyethersulfone Cardio Membranes for Direct Methanol Fuel Cell // Journal of Membrane Science. — 2005 (246), 167—172
3. Jeong M.H., Lee K.S., and Lee J.S. Synthesis and Characterization of Sulfonated Poly (arylene ether ketone) Copolymers Containing Crosslinking Moiety // Journal of Membrane Science. — 2009 (337), 145—152
4. Chen K., et al. Synthesis and Properties of Novel Sulfonated Polyimides Bearing Sulfohenyl Pendant Groups for Fuel Cell Application // Polymer. — 2009 (50), 510—518

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ СМЕСЕЙ СТИРОЛЬНЫХ ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ С ПОЛИПРОПИЛЕНОМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИАМИДА 6

Ю.М. Кривогуз, О.А. Макаренко

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,
yurikriv@tut.by

В настоящее время все более широкое применение находят термоэластопласты (ТЭП) [1]. Среди ТЭП особое место занимает блок-сополимер стирол-этилен-бутилен-стирол (СЭБС). Он нашел применение в качестве модификатора ударной вязкости конструкционных пластиков [2—4]. Кроме того, СЭБС применяется в качестве компатибилизатора в полимерных смесевых композитах для совмещения полистирола, полиэфиров или полиамидов с полимерами и сополимерами олефинов. Для улучшения компатибилизирующей активности СЭБС подвергают функционализации путем прививки к полиолефиновым блокам функциональных групп, способных вступать во взаимодействия физической или химической природы с функциональными группами других полимеров [2—4]. Однако для получения композиций с комплексом улучшенных свойств, например, с повышенной прочностью или ударной вязкостью, в качестве модификаторов целесообразно использовать сложные многокомпонентные системы на основе смесей СЭБС с другими полиолефинами (ПО). Эти смеси приходится также подвергать целенаправленной функционализации. Можно предположить, что свободнорадикальная прививка полярных мономеров к смесям СЭБС с другими ПО будет сопровождаться сложным комплексом макромолекулярных превращений. Однако сведения об особенностях процесса прививки мономеров к таким системам крайне ограничены.

В докладе представлены результаты изучения прививки транс-этилендикарбоновой кислоты (ТЭДК) в процессе реакционной экструзии к смесям СЭБС и полипропилена (ПП). Рассматривается возможность использования функционализированной смеси СЭБС/ПП в качестве модификатора ПА6.

Установлено, что соотношение полимерных компонентов в смеси СЭБС/ПП оказывает существенное влияние на эффективность прививки ТЭДК к макромолекулам. Данные по реологическому поведению расплавов смеси СЭБС/ПП с привитой ТЭДК ((СЭБС/ПП)-п-ТЭДК) свидетельствуют о том, что в ходе их функционализации одновременно протекают два побочных процесса: сшивание и деструкция макромолекул полимерных компонентов смеси. В смесях, содержащих больше 50 мас.% СЭБС, преобладает сшивка макромолекул, что приводит к снижению ПТР (СЭБС/ПП)-п-ТЭДК смесей. Напротив, при повышенных концентрациях ПП (более 50 мас.%) процессы деструкции СЭБС/ПП смеси

протекают настолько активно, что может быть получен функционализированный продукт с чрезвычайно низкой вязкостью расплава.

Показано, что добавки СЭБС в (СЭБС/ПП)-п-ТЭДК смесях приводят к замедлению их кристаллизации и снижению температуры плавления фазы ПП на 7—10 °С по сравнению с исходным ПП.

При прививке ТЭДК наблюдаются также существенные изменения механических характеристик смесей СЭБС/ПП. Повышение концентрации СЭБС до 50—75 мас.% приводит к снижению прочности при растяжении, но при этом резко возрастают значения относительного удлинения при разрыве (СЭБС/ПП)-п-ТЭДК.

Установлено, что смешение ПА6 с функционализированными смесями СЭБС/ПП является эффективным способом получения композитов с высоким уровнем значений ударной вязкости на образцах с надрезом, в том числе при температуре минус 40 °С.

Смесевые полиамидные композиты, полученные с использованием (СЭБС/ПП)-п-ТЭДК, обладают повышенными значениями предела текучести, механической прочности и ударной вязкости при комнатной температуре и при минус 40 °С по сравнению с полиамидными смесями, полученными при применении СЭБС-п-ТЭДК. Причиной этого может быть тот факт, что в случае смесевых систем на основе (СЭБС/ПП)-п-ТЭДК достигается улучшенная совместимость компонентов.

Таким образом, модифицирование ПА6 добавками (СЭБС/ПП)-п-ТЭДК позволяет получать смесевые композиты со значительно расширенным диапазоном полезных технологических и потребительских свойств.

1. Холден Д. Термоэластопласты. — Санкт-Петербург: Профессия. — 2011
2. Jose S., Thomas S., Lievana E., and Karger-Kocsis J. Morphology and Mechanical Properties of Polyamide 12 Blends with Styrene/Ethylene-Butylene/Styrene Rubbers with and without Maleation // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2005 (95), no. 6, 1376—1387
3. Heino M., Kirjava J., Hietaja P. and Seppala J.A. Compatibilization of polyethylene terephthalate/polypropylene blends with styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS) block copolymers // *J. Appl. Polym. Sci.* — 1997 (65), 241—249.
4. Horiuchi S., Matchariyakul N., Yase K., Kitano T., Choi H.K., and Lee Y.M. Compatibilizing Effect of Maleic Anhydride Functionalized SEBS Triblock Elastomer through a Reaction Induced Phase Formation in the Blends of Polyamide6 and Polycarbonate: 2. Mechanical Properties // *Polymer.* — 1997 (38), no. 1, 59—78

ТРАНСФОРМАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ И НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИ-L-ЛАКТИДА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л.П. Круль^{1,2}, Г.В. Бутовская¹, А.В. Ермолинский²,
Л.Г. Резникова², Е.Д. Скаковский³, Л.Ю. Тычинская³

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; krul@bsu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Беларусь

Введение. Ионизирующее излучение используется не только для стерилизации, но и для регулирования скорости разложения изделий из биodeградируемых полимеров, в том числе из поли-L-лактида (П-L-Л) [1—3]. Однако надежные сравнительные данные относительно эффективности воздействия на структуру и свойства П-L-Л излучений различного вида, в первую очередь γ -квантов и ускоренных электронов (\bar{e}) до настоящего времени отсутствуют. Это объясняется тем, что при использовании потока \bar{e} сложно исключить разогрев облучаемого образца и обеспечить равномерность распределения поглощенной дозы D по его толщине.

Цель работы заключалась в определении зависимостей характеристик молекулярной и надмолекулярной структуры П-L-Л от D при воздействии на полимер γ -излучения и потока ускоренных электронов.

Материалы и методы. В качестве исходного полимера использовали гранулированный П-L-Л марки 4043D фирмы «Nature Works LLC», США. γ -Облучение проводили при комнатной температуре на изотопной установке УГУ-420; облучение потоком \bar{e} — на многоцелевом линейном ускорителе УЭЛВ-10-10 при температуре, не превышающей 45 °С. Величины D варьировали от 120 до 1200 кГр.

Значения радиационно-химического выхода деградации G_s определяли из зависимости среднечисловой молекулярной массы облученного полимера $\langle M_n \rangle$ от величины D [4]. Величины $\langle M_n \rangle$ находили из спектров ЯМР ¹H растворов П-L-Л в дейтерохлороформе (спектрометр Bruker-500, рабочая частота 500 МГц), а также по экспериментально определенным значениям средневязкостной молекулярной массы с учетом величин гамма-функции и коэффициента α в уравнении Марка-Куна-Хаувинка-Сакурады в предположении наиболее вероятного молекулярно-массового распределения цепей полимера [5].

Содержание D -звеньев в макромолекулах (x_D) находили методом поляриметрии (автоматический поляриметр АТАГО AP-300).

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (NETZSCH STA 449C, скорость нагрева 5 °С/мин) находили температуры стеклования (T_g) и плавления (T_m) П-L-Л. Для калибровки температурной шкалы в качестве стандарта применяли индий.

Результаты и обсуждение. Впервые обнаружено возрастание содержания D -звеньев в макромолекулах П-L-Л при воздействии ионизирующего

излучения. Показано, что степень изменения значений x_D , $\langle M_n \rangle$, T_g и T_m полимера при облучении γ -квантами или потоком \bar{e} не зависит от вида ионизирующего излучения и определяется только величиной D (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики структуры П-L-Л

D , кГр	Вид излучения	$\langle M_n \rangle$, г/моль	x_D , %	T_g , °С	T_m , °С
0	—	90800	5,0	63±3	150±3
250	γ	9900	—	56±3	146±12
360	\bar{e}	11200	6,0	57±3	143±10
500	γ	8100	9,5	52±3	142±8
600	\bar{e}	7500	7,8	57±3	137±14
700	γ	4700	10,0	57±3	130±12
840	\bar{e}	5600	9,0	52±3	129±11
1000	γ	3000	10,5	52±3	129±5
1200	\bar{e}	3300	13,3	45±3	117±12

Отмечено снижение величин $\langle M_n \rangle$ П-L-Л с увеличением поглощенной дозы излучения, свидетельствующее о преимущественном разрыве макромолекул. Значения G_s для γ -излучения и потока \bar{e} составляют $3,0 \pm 0,4$ и $2,2 \pm 0,2$ разрыва на 100 эВ поглощенной энергии.

Обсуждаются возможные причины, определяющие характер зависимостей параметров фазовой структуры П-L-Л от величины D .

Авторы выражают благодарность Л.П. Сальникову, Д.И. Демидову Л.П. Рогинцу и И.А. Сальниковой за организацию и осуществление радиационной обработки П-L-Л.

1. Salvatore M., Marra A., Duraccio D., Shayanfar S., Pillai S., Cimmino S., and Silvestre C. Effect of Electron Beam Irradiation on the Properties of Polylactic Acid / Montmorillonite Nanocomposites for Food Packaging Applications // Appl. Polym. Sci. — 2015 (133), № 2, 42219—42230
2. Mansouri M., Berrayah A., Beyens C., Rosenauer C., Jama C., and Maschke U. Effects of Electron Beam Irradiation on Thermal and Mechanical Properties of Poly(lactic acid) Films // Polym. Degrad. Stab. — 2016 (133), № 2, 293—302
3. Madera-Santana J., Melendrez R., Gonzales-Garcia G., Quintana-Owen P., and Pillai D. Effect of Gamma Irradiation on Physicochemical Properties of Commercial Poly(lactic Acid) Clamshell for Food Packaging // Radiat. Phys. Chem. — 2016 (123), 6—13
4. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры. Пер. с англ.— М.: ИЛ. — 1962
5. Schaeffgen J.R. and Flory P.J. Synthesis of Multichain Polymers and Investigation of their Viscosities // J. Am. Chem. Soc. — 1948 (70), no. 8, 2709—2718

МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ РАСТЕНИЕВОДЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИАКРИЛАМИДА

Л.П. Круль^{1,2}, Е.В. Гринюк^{1,2}, Е.К. Фомина¹, О.И. Мамаев³

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; krul@bsu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³ООО «ШАУЭР ГРУПП», Минск, Беларусь

Введение. Функционализированный полиакриламид (ФПАА), макромолекулы которого содержат карбоксилатные и/или сульфогруппы, относится к водорастворимым ионогенным полимерам, широко используемым в качестве основы для получения композиций различного назначения, в том числе включающих макромолекулярные комплексы (ММК) с ионами микроэлементов, применяемых в растениеводстве [1]. Такие ММК могут представлять собой и полиэлектролитные гидрогели (ПЭГГ) с высокой водоудерживающей способностью [2]. Актуальными остаются вопросы синтеза ФПАА и изучения строения ММК, получаемых на их основе.

Целью работы явилось выяснение особенностей синтеза ФПАА в водных растворах смесей соответствующих сомономеров с использованием метода фронтальной сополимеризации [3], а также установление состава ММК меди, цинка, кобальта, марганца с различными ФПАА.

Материалы и методы. При синтезе ФПАА методом фронтальной сополимеризации в качестве сомономера к акриlamиду использовали как 2-акриламидо-2-метилпропансульфо-кислоту, так и акрилат натрия. Инициатор полимеризации служил персульфат аммония. Карбоксилированный полиакриламид (КПАА) получали также щелочным гидролизом полиакрилонитрильного волокна Нитрон Д [6]. Процессы комплексообразования и состав ММК исследовали методами абсорбционной спектроскопии, Фурье-ИК и ЯМР ¹³C спектроскопии.

Результаты и обсуждение Определено влияние концентрации инициатора полимеризации, а также мольного соотношения сомономеров в реакционной смеси на возможность их сополимеризации во фронтальном режиме и на скорости распространения полимеризационных фронтов. Установлено, что увеличение содержания ионогенного сомономера в исходной смеси негативно сказывается на возможности осуществления сополимеризации во фронтальном режиме, приводя к необходимости увеличения концентрации инициатора. Показано, что введение N,N'-метиленбисакриламида в качестве сшивающего агентов в исходную мономерную смесь приводит к стабилизации полимеризационного фронта, что позволяет повысить скорость процес-

са, а также снизить минимальную концентрацию инициатора, необходимую для осуществления синтеза ФПАА во фронтальном режиме.

Обнаружено, что растворимость ММК, образующихся при комнатной температуре при смешивании водных растворов сульфатов Cu(II), Zn(II), Co(II) и Mn(II) с КПАА, полученным щелочным гидролизом волокна Нитрон Д, а также их состав определяются отношением мольных концентраций группы COO⁻ сополимера и иона микроэлемента Me(II) в растворе. Показано, что нерастворимые ММК (преимущественно бидентатные) формируются при отношениях COO⁻ : Me(II) ≤ 2 : 1. При этом изменяется степень гидратации амидной группы сополимера и становится возможным участие атомов азота в образовании координационной связи с ионами Me(II). При уменьшении концентрации ионов микроэлементов и соответствующем увеличении количества молекул воды образуются монодентатные комплексы, а также мостиковые (или псевдомостиковые) связи. Показано влияние pH растворов КПАА в присутствии ионов Cu(II) на комплексообразование в системе.

Установлено, что только растворимые ММК ионов микроэлементов с КПАА пригодны в качестве эффективных микроудобрений, предназначенных как для устранения дефицита питания у растений, так и для равномерного распределения и закрепления подкормочных составов на листовой поверхности с пролонгированным высвобождением действующих веществ из полимерной матрицы.

1. Фомина Е.К., Круль Л.П., Бутовская Г.В., Гринюк Е.В., Шахно О.В., Скаковский Е.Д., Тычинская Л.Ю. Определение состава макромолекулярных комплексов микроэлементов с сополимером акриламида и акрилата натрия методом спектроскопии ЯМР ¹³C // Вес. НАН Беларуси. Сер. хим. наук. — 2016, № 4, 80—90
2. Фомина Е.К., Круль Л.П., Гринюк Е.В., Якименко О.В. Влияние ионов Cu²⁺, Zn²⁺, Mn²⁺ на водопоглощение полиэлектролитных гидрогелей на основе гидролизата полиакрилонитрильного волокна // Журн. прикл. химии. — 2014 (87), № 9, 1345—1350
3. Гринюк Е.В., Круль Л.П. Фронтальная сополимеризация акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфо-кислотой и с акрилатом натрия в водных растворах // Полимерные материалы и технологии. — 2016 (2), № 1, 48—53

ФОТОУПРАВЛЯЕМЫЕ ХИРАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ АЗОКРАСИТЕЛЕЙ И МАЛЕОПИМАРОВОЙ КИСЛОТЫ

В.С. Микулич*, А.С. Яковлева, Ан.А. Муравский, М.П. Бей, Ал.А. Муравский

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь, mikulich.vadim@gmail.com

Введение. Композитные материалы на основе жидких кристаллов (ЖК) и фоточувствительных соединений, такие как азокрасители, представляют научный и практический интерес благодаря возможности их использования в качестве оптических переключателей, получению отражателей ИК-излучения, фотоуправления лазерными системами и т.д. Для получения хиральных добавок используются различные оптически активные соединения: производные ментола, сорбитола и др [1]. Малеопимаровая кислота (МПК), которая выделяется из аддукта канифоли и малеинового ангидрида, находит широкое применения при производстве алкидных смол, красок, однако известно, что она проявляет оптическую активность, что представляет интерес для использования ее в качестве оптически активного центра в хиральных добавках.

Цель. Целью данной работы является изучение новых фотоуправляемых хиральных добавок на основе азокрасителей, которые позволяют управлять шагом закрутки жидкого кристалла, определения шага закрутки спирали и его изменение при облучении.

Материалы и методы. Очищенные стеклянные подложки дополнительно активировали на установке УФ-очистки Photo Surface processor PL 16-110D, SEN Lights Corp., Япония. Для изготовления жидкокристаллической ячейки использовались стеклянные подложки толщиной 2,0 мм, на которые наносился ориентирующий слой нейлон-6, который после отжига при 180°C в течение 1 часа натерли щеткой с хлопковыми волокнами в качестве ворса (длина ворса 2 мм). Затем собирали клинообразную ЖК-ячейку с толщиной спейсера 20 мкм. В жидкий кристалл E7, Merck вносили 1% хиральной добавки и нагревали до просветления смеси трижды и заправляли ячейки. Синтезированные хиральные добавки представлены на рис. 1.

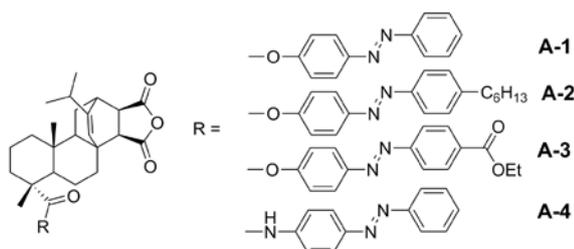


Рис. 1. Структуры хиральных добавок

Результаты и обсуждение. На рис. 2 показаны нормализованные спектры поглощения азобензольных

фрагментов в растворе диоксана.

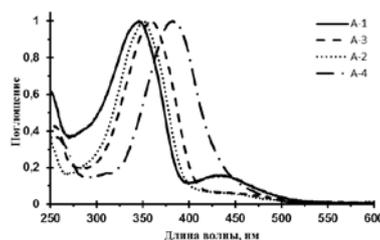


Рис. 2 Спектры поглощения азобензольных фрагментов

Для полученных соединений определяли шаг закрутки спирали, используя клинообразные ЖК-ячейки. Также для определения изменения угла закрутки при облучении УФ-светом (1 минута, мощность 40 мВт), измеряли угол закрутки спустя 15 минут после экспонирования. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерения шага закрутки холестерического жидкого кристалла

Хиральная добавка	Шаг спирали, мкм	Шаг спирали после облучения, мкм
A-1	-	-
A-2	26	19,6
A-3	20	21
A-4	16,6	16,9

Для хиральной добавки A-1 определить шаг закрутки не удалось, что связано с ее низкой растворимостью в жидком кристалле. Подобное же наблюдалось и для хиральной добавки A-4, но шаг закрутки спирали определен (16,6 мкм). Для добавки A-3 наблюдается незначительное изменение шага закрутки спирали, что может быть связано с быстрыми процессами *транс-цис-транс*-изомеризации азобензольного фрагмента. Добавка A-2 характеризуется значительными фотоиндуцированными изменениями шага закрутки спирали, что связано с ее высокой фоточувствительностью, а также стабильностью *цис*-формы азобензольного фрагмента. Разработанные фотоуправляемые добавки способны обратимо уменьшать/увеличивать шаг закрутки спирали при облучении УФ-/видимым светом и могут найти применение в разработке энергоэффективных окон.

- Kim Y. and Tamaoki N. A Photoresponsive Planar Chiral Azobenzene Dopant with High Helical Twisting Power // J. Mater. Chem. C. — 2014, 2 (43), 9258—9264

ТРУДНОГОРЮЧИЙ ПЕНОПОЛИУРЕТАН КАК ОГNETУШАЩЕЕ СРЕДСТВО

М.М. Тихонов, В.В. Богданова

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, Беларусь; timax1978@gmail.com

Введение. В настоящее время активно разрабатываются новые огнетушащие средства (ОС) для тушения различных классов пожаров: твердых горючих материалов (ТГМ), легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), электроустановок, находящихся под напряжением. Однако, тушение каждого класса пожаров требует использование различных ОС. Поэтому актуальным является разработка эффективного единого ОС, пригодного для тушения пожаров различных классов.

Цель данной работы — исследовать огнетушащую эффективность разработанного трудногогорючего пенополиуретана (ППУ) на основе ППУ марки «Изолан-125» [1] по сравнению с используемыми на практике ОС для тушения ТГМ, ЛВЖ, а также оценить его диэлектрические свойства.

Результаты и обсуждение. Исследование огнетушащей эффективности трудногогорючего ППУ при тушении лабораторного очага пожара класса А проводили по методике [2], разработанной на основе СТБ 11.13.04-2009 [3] с соблюдением условий геометрического подобия.

Для тушения лабораторных очагов использовали разработанную нами переносную установку для подачи трудногогорючего ППУ в кабельные шахты гражданских зданий [4]. Сопоставительные усредненные количества израсходованных ОС на тушение лабораторного очага и их удельный расход на квадратный метр поверхности очага представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расход ОС на тушение очага пожара класса «А»

ОС	Концентрация, %	Объем ОС, израсходованного на тушение, $V \times 10^{-3}$, дм ³	Наличие повторного воспламенения	Удельный расход ОС, дм ³ /м ²
Вода	—	60,0	нет	0,50
Вода+1% ПО-6НСВ	—	45,0	нет	0,38
Тофасил	15	26,7	нет	0,22
АН60-КМ	15	22,5	нет	0,19
Трудногогорючий ППУ	—	19,6	нет	0,16

Исследование огнетушащей эффективности ППУ при тушении лабораторного очага пожара класса «В» проводили по методике, разработанной на основе стандарта [3], с соблюдением условий геометрического подобия.

Полученные данные по удельному расходу трудногогорючего ППУ сравнивались с удельными расходами других огнетушащих средств, применяемых при тушении пожаров класса «В». Сопостави-

тельные усредненные количества ОС на тушение лабораторного очага пожара класса «В» представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расход ОС на тушение очага пожара класса «В»

Огнетушащее средство	Удельный расход ОС, дм ³ /(м ² ·с)
Тонкораспыленная вода	0,30
Раствор пенообразователя с применением:	
- фторсодержащих пленкообразующих ПО целевого назначения;	0,10
- ПО-1;	0,08
- ПО-1Д;	0,12
- САМПО, ПО-6НП [5];	0,15
- ПО-ЗАИ, ТЭАС, ПО-ЗНПО, ПО-6ТС.	0,15
Трудногогорючий ППУ	0,06

Результаты экспериментов показали, что огнетушащая эффективность трудногогорючего ППУ существенно выше по сравнению с водой, водой с ПАВ и сопоставима по удельному расходу со специализированными жидкостными синтетическими средствами (АН60-КМ, Тофасил) при тушении пожара класса «А», а удельный расход на тушение пожара класса «В» разработанным трудногогорючим ППУ сравнительно меньше удельных расходов других огнетушащих веществ, что свидетельствует о его более высокой огнетушащей эффективности.

Исследования электрического сопротивления разработанного ОС сопоставимо с электрическим сопротивлением воздуха, что открывает перспективность использования разработанного огнезащитного ППУ для тушения пожаров в электроустановках, находящихся под напряжением.

1. Тихонов М.М., Богданова В.В., Пармон В.В. Обеспечение безопасности эксплуатации кабельных шахт гражданских зданий // Чрезвычайн. ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2014, № 2 (36), 46—57
2. Богданова В.В. и др. Огнетушащая эффективность жидкостных химических составов при тушении пожаров класса А распылительными устройствами пожаротушения // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. — 2008, № 1, 35—41
3. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная техника. Огнетушители переносные. Общие технические условия: СТБ 11.13.04-2009. — Введ. 01.09.2009. — Минск: НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси. — 2009
4. Ранцевая установка для подачи трудногогорючего пенополиуретана: пат. 10112 Респ. Беларусь, А 62С 15/00 (2006.01), А 62С 31/12 (2006.01), В 05В 7/02 (2006.01), В 01F 5/18 (2006.01), В 01F 3/14 (2006.01) / М.М. Тихонов, В.В. Богданова, О.Н. Бурая; заявитель Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь — и 20130873; заявл. 30.10.2013; опубл. 30.06.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2014, № 3 (98), 183

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОТЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ ТЕРПЕНОИДНОМАЛЕИНОВЫМИ АДДУКТАМИ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

И.А. Латышевич¹, Г.Н. Лысенко¹, Н.Р. Прокопчук², А.Ю. Клюев¹, Н.Г. Козлов¹

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

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Благодаря своим разнообразным пленкообразующим и физико-химическим свойствам терпеноидномалеиновые аддукты (аддукты ТДМА) могут быть с успехом использованы в качестве отвердителя при разработке новых термоотверждаемых лаковых покрытий.

Целью работы является исследования возможности использования ИК-спектроскопии для определения полноты отверждения эпоксидных смол (ЭС) аддуктами ТДМА.

ИК спектры образца лакового покрытия и исходных компонентов — аддуктов ТДМА (на примере терпеноидномалеинового аддукта (аддукт ТМА)) в виде таблеток, спрессованных с мелкодисперстным KBr, а ЭС марки Э-40 — в виде пленки на оптическом стекле KBr были записаны на ИК-Фурье спектрометре «Protégé 460» фирмы «Nicolet» (США) со спектральным разрешением 4 см⁻¹.

В ИК спектре лакового покрытия обнаружены полосы поглощения (ПП), принадлежащие согласно [1] ангидридным группам, связанные с проявлением валентных (ν) колебаний связи C=O (1863 и 1778 см⁻¹), ПП связей ν^{as} C—O—C (1231 см⁻¹), ν^s C—O—C (1069 см⁻¹) и слабое поглощение в области проявления скелетных колебаний ангидридного кольца (916 см⁻¹). Интенсивность указанных ПП резко снижена по сравнению с подобными полосами в спектре аддукта ТМА.

При сравнении ИК спектров лака и ЭС видно, что основные изменения в области проявления эпоксидных групп. Заметен значительный спад поглощения в области проявления связей эпоксидного кольца - ν^{as} C—O—C (1247 см⁻¹), ν^s C—O—C (1037 см⁻¹), скелетных колебаний (915 см⁻¹ с плечом при 862 см⁻¹) и веерных колебаний CH₂ групп кольца. В [2] по изменению интенсивности ПП 915 см⁻¹ рассчитывалось количество эпоксидных групп, вступивших в реакцию сополимеризации в процессе отверждения. Наряду с этим в ИК спектре лака появляются новые ПП, характерные для сложноэфирных групп - ν (C=O) (1736 см⁻¹), ν^{as} C—O—C (1231 см⁻¹) и ν^s C—O—C (1085 см⁻¹), а также полосы 1179, 1102, 874 см⁻¹. Наблюдается увеличение поглощения в области O—H групп 3800—3100 см⁻¹. Увеличение поглощения в указанном интервале со слабой асимметрией при ~ 3550 см⁻¹ свидетельствует о появлении свободной O—H группы, δ колебания связей C—OH и O—H которой и проявляются в спектре лака при 1179, 1102 и 874 см⁻¹. Соотношение интенсивностей ПП ароматических в спектре лака, групп CH₃ практически оста-

ся тем же самым, что и в спектре ЭС, что подтверждает об неучастии этой части ЭС в процессе отверждения. Вместе с тем уменьшается интенсивность ПП внеплоскостных деформационных (δ) колебаний связи C—H ароматического кольца (830 см⁻¹) и полосы, относящейся к проявлению δ колебания вторичной гидроксильной группы (1184 см⁻¹), по которой происходит сшивка.

Имеющиеся литературные данные и приведенные выше особенности проявления ЭС и аддукта ТМА в ИК спектре лакового покрытия дают возможность предположить следующие стадии, происходящие в процессе отверждения ЭС [3].

Взаимодействие ЭС и аддуктов ТДМА предположительно происходит в три стадии и может быть представлено следующими схемами уравнений (рисунк 1).

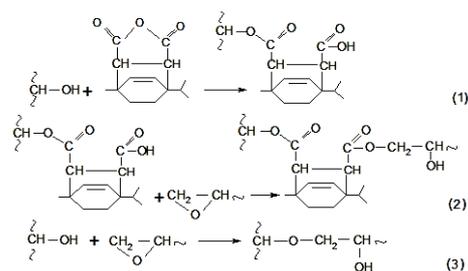


Рис. 1. Схема взаимодействия эпоксидной и терпеноидномалеиновой смол

В начальный момент протекает реакция этерификации с образованием моноэфира ТМА (стадия 1), а затем уже карбоксильная группа взаимодействует с эпоксидной группой смолы. В результате такой реакции образуется диэфир ТМА (стадия 2). Одновременно протекает стадия 3, катализируемая непрореагировавшим ТМА.

Как показали проведенные исследования ИК-спектроскопию возможно использовать для определения полноты протекания реакции отверждения ЭС аддуктами ТДМА.

1. ИК спектры основных классов органических соединений. Табличные данные. Составитель Тарасевич Б.Н. — М. — 2009
2. Вернигоров К.Б., Карзов И.М., Костина Ю.В., Яблокова М.Ю., Алентьев А.Ю. Модификация эпоксидной смолы полиамидокислотой: исследование механизма соотверждения // Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия. — 2011 (52), № 2, 122—129
3. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. — М.: Химия. — 1966

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИМПРЕГНИРОВАНИИ ПОЛИМЕРОМ

Д.А. Черноус¹, В.В. Хатько²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; depa10@tut.by

²Белорусский государственный технический университет, Минск, Беларусь

Введение. В настоящее время в передовых отраслях промышленности активно внедряются материалы и изделия, структурированные на наномасштабном уровне. Примером подобных объектов являются нанопористые покрытия и мембраны на основе анодированного оксида алюминия [1, 2]. С целью повышения эффективности использования данных систем осуществляется ингибирование покрытий различными функциональными материалами. В известной научной литературе недостаточно подробно исследованы процессы ингибирования и закономерности изменения характеристик нанопористых анодных покрытий при заполнении пор.

Целью работы является экспериментальное изучение влияния технологических параметров процесса импрегнирования на трибомеханические характеристики металлополимерного покрытия на основе анодного оксида алюминия.

Материалы и методы. Упорядоченная структура анодного оксида алюминия (рис. 1) характеризуется диаметром пор d и расстоянием между центрами соседних пор D . Если поры заполнены (импрегнированы) материалом, объемная доля наполнителя c будет определяться отношением d/D .

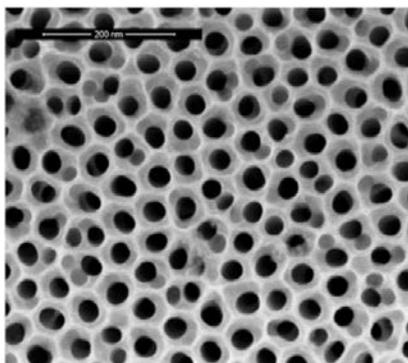


Рис. 1. Микрофотография пористого анодного оксида алюминия

В качестве объекта исследования выберем покрытие на основе анодного оксида алюминия, изготовленное в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники. Толщина покрытия $h = 70$ мкм. Материал подложки — алюминий. Были изготовлены две партии образцов покрытия с пористостью $c_1 = 0,54$ и $c_2 = 0,75$.

Ингибирование покрытия политетрафторэтиленом (ПТФЭ) проводилось на разработанной в ИММС НАН Беларуси опытно-промышленной

установке плазмохимической обработки (ПХО) углеродных волокон [3]. Измерения коэффициента трения образцов композитного покрытия по стали проводились на универсальном микротрибометре MTU-2K7 в трибоцентре ИММС НАН Беларуси.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости коэффициента трения покрытия от времени обработки образца. Можно отметить, что при $t_{об} > 30$ мин коэффициент $\mu_{жс}^k$ стабилизируется. По видимому, с увеличением времени обработки повышается степень заполнения пор полимерным наполнителем и при $t_{об} \approx 30$ мин глубина проникновения полимера достигает максимального значения. Теоретическая интерпретация данной закономерности станет предметом дальнейших исследований.

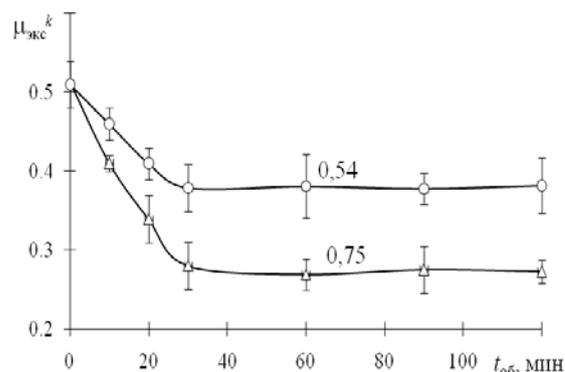


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения композитного покрытия от времени плазмохимической обработки. Числа у кривых соответствуют значению объемной доли c

Заключение. Установлено, что при импрегнировании наноструктурированного анодного оксида алюминия методом ПХО эффективный коэффициент трения покрытия практически линейно убывает с увеличением времени обработки. Это наблюдение свидетельствует о влиянии на параметры покрытия глубины проникновения полимера.

1. Goldade V., Shil'ko S., and Neverov A. Smart Materials Taxonomy. — CRC Press, Taylor & Francis Group. — 2015
2. Мухуров Н.И., Ефремов Г.И. Электромеханические микроустройства. — Минск: Беларуская навука. — 2012
3. Патент РБ № 6214, МПК С 08J. Способ модифицирования углеродных наполнителей для политетрафторэтилена / Шелестова В.А., Гракович П.Н. — № 19990866, Заявл. 06.09.1999; Опубл. 30.03.2001 // Официальный бюллетень. — 2001, № 1, 33

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ НА ПРОЦЕССЫ ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА

А.В. Антусёва¹, Е.Ф. Кудина², Г.Г. Печерский¹, Ю.Р. Кускильдина¹

¹РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», БелНИПИнефть, Гомель, Беларусь;
a.antuseva@beloil.by

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. В условиях белорусских месторождений с 2012 г применяется силикатная композиция на основе гидросиликата натрия, модифицированного кислотным реагентом. Известно, что для приготовления силикатных композиций в качестве воды затворения необходимо использовать пресную воду, не содержащую ионов двухвалентных металлов (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Результаты анализов проб силикатных композиций, приготовленных с использованием различных вод затворения, показали, что состав воды существенно влияет на процессы гелеобразования [1].

Цель работы состояла в исследовании влияния типа воды затворения как многокомпонентного раствора на физико-химические показатели силикатных композиций, а также изучении возможности снижения чувствительности композиции к минерализации воды путем применения химических реагентов.

Материалы и методы

В качестве гелеобразующей основы использовали силикат натрия гидратированный порошкообразный. Для инициирования процесса гелеобразования применяли сульфаминовую кислоту. С целью регулирования агрегативной устойчивости гелеобразующих композиций исследовали возможность применения нитрилтриметилфосфоновой кислоты.

Для изучения особенностей процессов гелеобразования в зависимости от типа воды затворения оценивали физико-химические показатели и состав технической воды.

Анализ технических жидкостей выполнен по показателям: плотности, pH — с помощью автоматического плотномера DMA 4500 (AntonPaar, Германия) и pH-метра MettlerToledo (SevenMulti) соответственно. Динамическую вязкость свежеприготовленных проб определяли капиллярным вискозиметром ВПЖ-2, величину межфазного натяжения пробы композиции в контакте с нефтью — методом «висячей капли» с помощью анализатора формы капли DSA-100 (KRUSS, Hamburg). Кинетику гелеобразования исследовали осцилляционным методом на реометре PhysicaMCR 301 по изменению во времени показателей модулей упругости (G') и потерь (G'').

Результаты и обсуждение

Известно, что способность катионов двухвалентных металлов при контакте с раствором силиката натрия образовывать осадки не позволяет использовать в качестве затворения минерализованную во-

ду, содержащую Ca^{2+} и Mg^{2+} . Опытным путем определена пороговая концентрация катионов кальция и магния, при которой не происходит нарушение агрегативной устойчивости смеси — 0,15 г/л.

Установлено, что использование добавки нитрилтриметилфосфоновой кислоты (0,15—0,2%) позволяет получить однородный прозрачный раствор гидросиликата натрия при использовании в качестве воды затворения пробу технической воды, содержащую 1,0 г/л Ca^{2+} .

Установлено, что ионный состав воды затворения оказывает значительное влияние на время гелеобразования композиций. Так, разница значений показателя «время гелеобразования» для некоторых образцов составляет 3,5 ч.

Вместе с тем, отмечены незначительные отличия в плотности и динамической вязкости растворов композиций, приготовленных с использованием разных проб технической воды затворения. Расхождение между исследуемыми показателями составляет не более 0,1%.

Межфазное натяжение исследуемых композиций на основе силиката натрия на границе с моделью нефти изменяется в диапазоне 1,78—2,17 мН/н, что значительно ниже значения для пресной воды (20,53 мН/м). Это свидетельствует о высокой поверхностной активности предлагаемых композиций и способности к нефтеотмыву вне зависимости от типа воды затворения.

Выводы

Таким образом, результаты выполненных исследований показывают сложность и неоднозначность поведения гидрогелей на основе гидросиликата натрия и сульфаминовой кислоты при воздействии внешних факторов.

Использование нитрилтриметилфосфоновой кислоты в качестве агента, регулирующего агрегативную устойчивость композиций на основе силиката натрия, позволяет снизить чувствительность гелеобразующей основы к составу воды затворения.

Очевидно, для обеспечения эффективности промысловых работ необходимо предъявлять высокие требования к концентрационному составу воды затворения.

1. Антусёва А. В., Печерский Г. Г., Макаревич А. В. Неорганические гелеобразующие композиции для повышения нефтеотдачи низкопроницаемых и высокотемпературных пластов // Нефтяник Полесья. — 2014 (26), № 2, 20—30

ФОТОПРЕВРАЩЕНИЯ БРИЛЛИАНТОВОГО ЖЕЛТОГО В ПОЛИМЕРНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

С.Н. Ларикова, Ж.Д. Чапланова, В.Е. Агабеков, Е.А. Грачева

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; larikova.svetlana@gmail.com

Введение. Установлено [1], что тонкие пленки на основе промышленного азокрасителя бриллиантовый желтый (БЖ) имеют высокую энергию сцепления с ЖК материалами, микроскопическую однородность и низкую стоимость, что позволяет использовать их в качестве фотоориентантов при получении высококонтрастных ЖК-дисплеев. Ранее [2] было показано, что введение БЖ в полимерную матрицу повышает его пленкообразующие свойства, а также способствует формированию композиционных пленок с заданной толщиной. При этом природа полимерной матрицы и используемых растворителей влияет на фотоориентацию пленок дихроичных красителей и величину их анизотропного поглощения [3].

Цель. Изучены фотопревращения БЖ в полимерных матрицах [поливинилпирролидон (ПВП), ацетилцеллюлоза (АЦ) и поливиниловый спирт (ПВС)] при облучении УФ/ВИД светом, а также неполяризованным и линейно поляризованным синим светом.

Материалы и методы. Тонкие пленки БЖ в ПВП (БЖ/ПВП), АЦ (БЖ/АЦ) и ПВС (БЖ/ПВС) осаждали на кварцевые и кремниевые подложки, предварительно обработанные в системе УФ-очистки Photo Surface Processor PL16-110D (Sen Lights Corp, Япония), центрифугированием растворов полимеров, содержащих 1 мас.% красителя, в воде, диметилформамиде (ДМФА) и метилпирролидоне (МП). Электронные спектры поглощения БЖ регистрировали на спектрофлуориметре CM 2203 (Solar, Беларусь). Пленки облучали синим светодиодом ($\lambda = 450$ нм, $I = 60$ мВт/см²) и полным светом ртутной лампы ДРТ-1000. Спектры поляризованных пленок записывали на спектрометре Ocean Optics HR4000-CG-UV-NIR. Морфологию пленок исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ NanoScope MultiMode, Veeco, США).

Результаты и обсуждение. Величина оптической плотности БЖ в полимерных пленках линейно зависит от концентрации красителя (0,7÷1,5) мас.% и полимеров (0,5÷10,0) мас.% в исходных растворах, что свидетельствует о равномерном распределении БЖ в полимерных матрицах. Наблюдаемые в спектрах поглощения пленок БЖ/АЦ и БЖ/ПВП, облученных УФ/ВИД светом, гипсохромный сдвиг λ_{\max} , рост оптической плотности в области 310—340 нм и изобестическая точка (рис. 1, а) позволяют предположить, что молекулы БЖ изомеризуются под действием УФ/ВИД света. В то же время в спектрах поглощения пленок, экспонированных неполяризованным синим светом, отсутствуют характерные при-

знаки транс-цис-изомеризации (рис. 1, б). Облученные пленки устойчивы к нагреванию (50 °С) и действию УФ-света ($\lambda = 365$ нм).

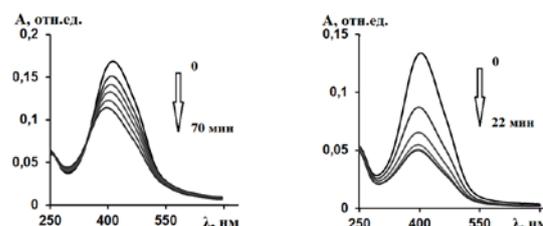


Рис. 1. Изменения спектров поглощения композиционных пленок БЖ/АЦ при облучении УФ/ВИД- и неполяризованным синим светом ($\lambda = 450$ нм)

При облучении линейно поляризованным светом в пленках на основе БЖ возникает необратимый дихроизм. Величина дихроичного отношения (ДО) зависит от природы используемых полимеров и растворителей (табл.).

Таблица. Спектральные характеристики исходных* и поляризованных композиционных пленок

Пленка	Растворитель	λ_{\max}^* , нм	ДО
БЖ/ПВС	вода	438	1
БЖ/ПВП	вода	427	1,9
БЖ/ПВП	МП	412	1,8
БЖ/АЦ	МП	411	12,5
БЖ/АЦ	ДМФА	411	9,9

Природа полимерной матрицы оказывает влияние на шероховатость (Rms) и морфологию композиционных пленок, содержащих БЖ (рис. 2).

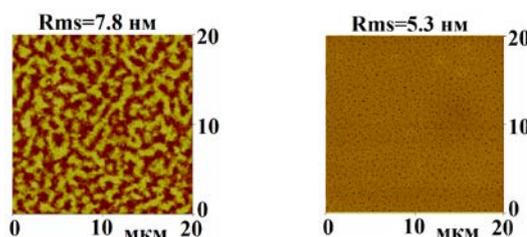


Рис. 2. АСМ-изображения топологии поверхностей пленок БЖ/АЦ (а) и БЖ/ПВП (б)

1. Finnemeyer V., Bryant D., Bos Ph. Reactive Mesogen Stabilized Azodye Alignment for High Contrast Displays // SID Digest. — 2015 (46), 991—993
2. Chaplanova Zh.D., Murauski A.A., Agabekov V.E., et al. Multilayered Anisotropic Films Based on Azo Dye Brilliant Yellow and Organic Polymers // J. Appl. Spectros. — 2013 (80), no. 5, 658—662
3. Chaplanova J.D., Larykava S.N., Agabekov V.E., et al. Photoorientation of Bisazodioksodibenzothiophene in the Matrix of Polyvinylpyrrolidone // J. Appl. Spectros. — 2016 (83), no. 4, 527—533

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА И ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

М.Л. Хейфец¹, А.Г. Колмаков², С.А. Клименко³

¹ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия;

³Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

Введение. Исследовать формирующиеся в процессах синтеза и применения материалов структуры и фазы, определить их количество позволяет физико-химический анализ диаграмм — геометрических образов соотношений: состав — свойство системы.

Основой анализа физико-химических диаграмм являются сформулированные Н.С. Курнаковым два принципа — непрерывности и соответствия, а также предложенный Я.Г. Горощенко третий принцип — совместимости.

Ввиду неравновесности быстропротекающих процессов синтеза и применения материалов и поверхностей изделий как на макро- и мезо-, так и на микро- и наноструктурном уровнях, их диаграммы состояния носят метастабильный характер.

Цель работы — дополнить основные принципы анализа физико-химических диаграмм для изучения неравновесных процессов формирования структур и фаз материала и поверхности изделия на макро-, мезо-, микро- и наноструктурном уровнях.

Термодинамика неравновесных процессов. Для анализа замкнутой, равновесной физико-химической системы предназначено уравнение фаз Гиббса. Вместе с тем оно применимо и для открытой системы, когда внешние потоки энергии и вещества рассеиваются диссипативными структурами. Функция диссипации ψ и производство энтропии σ при абсолютной температуре T :

$$\psi = T\sigma = T d\varepsilon/dt,$$

вследствие второго начала термодинамики возрастают ($\psi \geq 0$, $\sigma \geq 0$) во времени t .

В замкнутых условиях, в процессе эволюции с $d\varepsilon \geq 0$, система движется к состоянию равновесия, в котором $\varepsilon = \max$, $d\varepsilon = 0$; при этом производство энтропии не возрастает $d\sigma \leq 0$. В открытой системе условие эволюции сохраняется $d\sigma^* \leq 0$, а условие равновесия предполагает $\sigma = \min$, $d\sigma = 0$; при производной по времени: $d\sigma/dt \leq 0$.

Согласно фундаментальной теореме Пригожина — Глендсдорфа при эволюции во времени t к стационарному состоянию, произвольные системы с неизменяемыми по времени краевыми условиями выполняют: $d\sigma \leq 0$ — условие эволюции; $d\sigma = 0$ — условие стационарности; $\delta\sigma \geq 0$ — условие устойчивости.

В результате уравнение Гиббса с ограничения-

ми по производству энтропии, согласно теореме Пригожина-Глендсдорфа, позволяет рассматривать открытые неравновесные системы.

Фрактальная размерность диссипативной системы. Вследствие чувствительной зависимости от начальных условий (ЧЗНУ), состояние физико-химической системы рационально представить в виде аттрактора.

ЧЗНУ требует размерности аттрактора, удовлетворяющей неравенству для числа степеней свободы, $C > 2$. Вместе с тем трехмерный поток в фазовом пространстве для того, чтобы обладать ЧЗНУ должен обеспечивать $C < 3$, так как объемы в фазовом пространстве сокращаются со временем в случае диссипативной системы.

Аттрактор, который может представлять хаотический режим, должен быть таким, чтобы выполнялось неравенство $2 < C < 3$. Аттракторы, удовлетворяющие этому неравенству, обладают нецелой фрактальной размерностью.

Таким образом, можно утверждать, что диссипативная динамическая система может стать хаотической, если размерность фазового пространства больше двух. В результате во избежание непредсказуемости поведения детерминированных потоков энергии и вещества при их диссипации системе нужно предоставлять менее трех степеней свободы.

Заключение. Для изучения неравновесных процессов синтеза и применения материалов и поверхностей изделия на макро-, мезо-, микро- и наноструктурном уровнях целесообразно дополнить основные принципы физико-химического анализа: *непрерывности* — рассмотрением диссипации энергии при формировании структур и фаз; *соответствия* — фрактальными представлениями геометрических образов и *совместимости* — изучением возможных путей эволюции системы.

Развитие принципов физико-химического анализа позволяет количественно анализировать переходные процессы и структуры, описываемые нецелочисленными значениями C — степеней свободы системы и мультифрактальными параметрами Φ — формирующихся фаз.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского и Российского фондов фундаментальных исследований (код проекта Т16Р-176).

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИЦИОННОЙ МАТРИЦЫ АМГ2/ГРАФИТ + Al_2O_3

А.В. Аборкин, А.И. Елкин, Д.С. Хренов

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия; aborkin@vlsu.ru

Цель. Изучение эффективности газодинамического напыления и структурно-фазового состава гетерогенного покрытия на основе наноконпозиционной матрицы АМГ2/графит + Al_2O_3 .

Материалы и методы. Порошок был получен методом механического синтеза в шаровой планетарной мельнице за два технологических передела. На первом был получен наноконпозиционный порошок АМГ2/графит [1]. Исходная шихта представляла собой гранулы глобулярной формы диаметром 1—2 мм из алюминиевого сплава АМГ2 с добавлением 1 вес.% порошка графита (99,0%) фирмы Acros Organics с размером частиц менее 20 мкм. Обработку проводили в шаровой планетарной мельнице с применением поверхностно активных веществ (стеариновая кислота 1 вес.%) при частоте вращения 600 об/мин. На втором переделе к полученному наноконпозиционному порошку добавляли 10—90 вес.% $\alpha-Al_2O_3$ (здесь и далее указано содержание Al_2O_3 в порошке) и продолжали обработку при тех же режимах.

Результаты и обсуждение. В результате были получены порошки, представляющие собой механическую смесь, состоящую из агломератов и частиц Al_2O_3 . Агломераты представляют собой частицы наноконпозиционного матричного материала, содержащего нанокристаллический графит и внедренные в них, а также расположенными на поверхности частицами Al_2O_3 . Результаты измерения гранулометрического состава полученных порошков показывают, что изменение содержания Al_2O_3 в диапазоне 10—50 вес.% не оказывает значительного влияния на средний размер формируемых агломератов, который составляет ~ 17 мкм. Дальнейшее увеличение содержания Al_2O_3 ведет к снижению среднего размера в ~ 1,5 раза. В тоже время, сравнительный анализ гранулометрического состава порошков, полученных на первом переделе показывает, что введение Al_2O_3 и механическая обработка даже в течении 15 минут значительно снижает средний размер частиц, который составлял ~ 60 мкм. Анализ результатов рентгеноструктурных исследований показывает, что дифрактограммы имеют качественно схожий характер. Полученные порошки напыляли на подложки из сплава алюминия АМГ2М и стали 08кп. Режим напыления — стационарный при температуре потока воздуха 270 °С. Эффективность напыления покрытия определяли по величине прироста покрытия, которую вычисляли как разность массы подложек до и после холодного газодинамического

напыления. Анализ полученных результатов показывает, что в независимости от материала подложки наибольшая эффективность напыления достигается при 30 вес.% Al_2O_3 в порошковой смеси. Дальнейшее увеличение содержания Al_2O_3 ведет снижению роста покрытия, а при содержании в смеси Al_2O_3 более 50 вес.% сплошное покрытие не образуется, так как процессы эрозии становятся преобладающими, что ведет снижению массы подложки по сравнению с массой до напыления. Сравнение величин изменения массы подложек при напылении на сталь и алюминий показывает, что при содержании 10—35 вес.% Al_2O_3 эффективность напыления на подложку из стали в среднем на 27% выше. С одной стороны это обусловлено тем, что при соударении с более твердой (стальной) подложкой кинетическая энергия частиц порошка переходит в работу деформации частицы, не деформируя подложку, что положительно сказывается на инициации напыления. С другой стороны, учитывая, что подложки предварительно не подготавливали, наличие оксидной пленки на подложке из АМГ2М, также негативно сказывается на инициации напыления. Изучение микрогеометрии покрытий показывает, что для покрытий в не зависимости от содержания Al_2O_3 в порошке характерна развитая поверхность, представляющая собой совокупность деформированных частиц матричного материала и внедренных в них частиц Al_2O_3 и следы воздействия не закрепившихся частиц. Характерные размеры кристаллитов, видимых на ПЭМ-изображениях менее 100 нм. Сравнительный анализ микротвердости различных покрытий показывает, что увеличение содержания Al_2O_3 с 10 до 35 вес.% повышает микротвердость на 45% с 1,7 МПа до 3,2 МПа, что значительно превосходит микротвердость матричного материала даже после интенсивной пластической деформации [2].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-48-330156 p_a).

1. Aborkin A.V., Evdokimov I.A., Vaganov V.E., Alymov M.I., Abramov D.V., and Khor'kov K.S. Influence of Mechanical Activation Mode on Morphology and Phase Composition of Al-2Mg-nC Nanostructured Composite Material // *Nanotechnologies in Russia*. — 2016 (11), no. 5—6, 297—304
2. Аборкин А.В., Бабин Д.М., Захаров А.А. Влияние числа проходов при равноканальном угловым прессованием на эксплуатационные свойства алюминиевого сплава // *Материаловедение*. — 2013, № 11, 33—38

ОБЖИГ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ АТМОСФЕРЕ

Ю.И. Бохан, А.А. Варнава

Витебский филиал учреждения образования “Белорусская государственная академия связи”, Витебск, Беларусь; anastasya.varnava@gmail.com

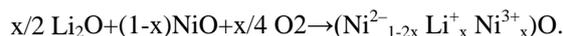
Введение. Перспективным направлением в области разработки эффективных термоэлектрических материалов является создание различных наноструктур, таких как квантовые точки, наноусы, сверхрешетки, объемные наноконпозиты [1].

Цель. В термоэлектрических наноконпозитах размер зерен обычно не превышает нескольких десятков нанометров. Очевидно, что для повышения термоэлектрической эффективности необходимо выполнение следующего условия: размер зерна должен быть меньше, чем средняя длина свободного пробега фононов, но больше, чем средняя длина свободного пробега носителей заряда (электронов или дырок). В этом случае фононы более эффективно рассеиваются на межзеренных границах, чем носители заряда, что приводит к более сильному уменьшению теплопроводности (за счет уменьшения решеточного вклада), по сравнению с уменьшением электропроводности, обеспечивая итоговое повышение термоэлектрической добротности. Однако уменьшение теплопроводности в объемных наноконпозитах может быть более существенным, чем уменьшение электропроводности. Таким образом, объемные наноконпозиты, состоящие из наноразмерных зерен термоэлектрического материала, разделенных естественными межзеренными границами, потенциально могут обладать высокой термоэлектрической эффективностью, так как будут иметь одновременно достаточно высокую электропроводность и низкую теплопроводность.

Оксидные керамические материалы с помощью процесса управляемой валентности возможно перевести в состояние полупроводника. Для этого обычно используются разные методы, такие как, метод восстановления, т.е. обжиг керамики в восстановительной среде [3—4], неизовалентного замещения. В этом случае удается получить приемлемую проводимость, при сохранении низкой теплопроводности.

Материалы и методы. Если убрать каким-либо способом, например, обжигом в восстановительной среде, избыточный кислород, раствор окислов получает дополнительный нескомпенсированный заряд в октаэдрах шпинели, что приводит к увеличению проводимости. Легирование оксида никеля литием в составе шпинели приводит к резкому увеличению проводимости за счет замены ионами лития ионов никеля в октаэдрических позициях. Образование твердого раствора с нескомпенсированным зарядом позволяет варьированием concentra-

ции лития создавать различный тип проводимости:



Отсюда следует, что, совмествив легирование с обжигом в восстановительной среде, можно получить керамические материалы с регулируемой проводимостью. Учитывая, что теплопроводность керамик определяется фононным механизмом с характерной длиной волны $\sim 5\text{--}10$ мкм, то создавая необходимую зерновую структуру керамики можно добиться значительного повышения добротности материала.

Результаты и обсуждение. На основании ранее проведенных исследований [5—6], предлагается использовать при производстве термобатарей известную технологию производства монолитных конденсаторов. При этом вместо полупроводниковых материалов, содержащих редкие и часто экологически опасные материалы, предлагается использовать оксидную керамику. В соединении с отработанной технологией пакетирования такой способ представляется перспективным для производства термобатарей большой площади. Кроме того, предлагаемая технология позволяет реализовать в многослойной структуре простыми методами шелкографии различные конструкции термоэлементов: от простейших до спиральных.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физматтех», подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии», задание 2.12.

1. Вихор Л.Н. Функционально-градиентные материалы и термоэлементы на их основе // Термоэлектричество. — 2007, № 1, 7—22
2. Лазарев В.Б., Красов В.Г., Шайлыгин И.С. Электропроводность оксидных систем и пленочных структур. — М.: Наука. — 1978
3. Бондаренко Б.И. Восстановление окислов металлов в сложных газовых системах. — Киев: Наукова Думка. — 1980
4. Бохан Ю.И., Лалетин В.М., Сараско М.Н. Удельное сопротивление композиционных порошков Ni-Al₂O₃, Co-Al₂O₃, Cu-Al₂O₃ // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2014, № 3, 28—30
5. Бохан Ю.И. Наноструктурные многослойные композиционные материалы для термоэлектрических преобразователей. / Наноструктурные материалы — 2016: Беларусь — Россия — Украина : НАНО—2016 : материалы V Междунар. науч. конф., Минск, 22—25 нояб. 2016 г. — 2016, 556—559
6. Бохан Ю.И., Щепетков В.Н. Керамические многослойные LC-фильтры на основе композиционных материалов // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф. — Минск. — 2016 (3), 62—64

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ю.И. Бохан, А.А. Варнава

Витебский филиал учреждения образования “Белорусская государственная академия связи”, Витебск, Беларусь; anastasya.varnava@gmail.com

Введение. В основе любого термоэлектрического охлаждающего прибора лежит элементарный термоэлемент, представляющий собой соединенные последовательно две полупроводниковые ветви, одна из которых обладает электронной (n), а другая дырочной (p) проводимостью. При заданном токе величина понижения температуры зависит от тепловой нагрузки на нем [1].

Цель. Для увеличения коэффициента добротности термоэлемента в настоящее время считаются наиболее перспективными материалы на основе теллурида висмута [2]. Однако они имеют узкий диапазон градиента температур и сложность в производстве. Поэтому представляется интересным разработка материалов из проводящих полупроводниковых керамик на основе оксидов переходных металлов или композиционных материалов [3]. Особый интерес представляют керамические материалы, обладающие отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (термисторы с ОТКС). Такие материалы могут изменять величину проводимости в широких пределах, что открывает хорошие перспективы их использования в качестве материалов ветвей (рис. 1).

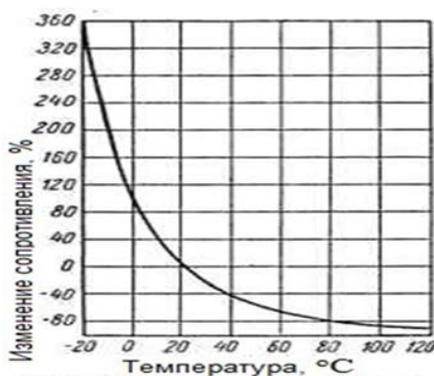


Рис. 1. Типичная температурная зависимость сопротивления для термистора с ОТКС

Материалы и методы. Преобладающей моделью проводимости термисторов с ОТКС является модель прыжковой проводимости [4], которая в приближении “неадиабатического” полярона малого радиуса приводит к существенной температурной зависимости проводимости:

$$\sigma = \pi^2 \frac{e^2 a^2 J^2 E^{-1/2}}{h(kT)^2} \exp(-E/kT), \quad (1)$$

где: a — эффективная длина прыжка, J — параметр рассеяния, E — энергия активации прыжка, T — температура. Подстановка выражения (1) в коэффициент добротности материала дает существенную температурную зависимость последнего.

Результаты и обсуждение. В работе методами неравновесной термодинамики [5] получены выражения для баланса энергии и энтропии с учетом температурной зависимости проводимости. Учет зависимости проводимости от температуры приводит к появлению дополнительного слагаемого в выражении для потока теплоты, приводящего к нарастанию потока электрического тока. Совместное действие указанных потоков позволяет ввести эффективную добротность материала, которая определяется условиями нарастания тока. Такое нелинейное изменение условий протекания тока, в свою очередь, приводит к увеличению добротности термоэлемента.

Предложен ряд материалов для ветвей термоэлементов на основе оксидов металлов с переменной валентностью. Показано, что использования оксидных полупроводников переменной валентностью позволяет уменьшить теплопроводность термоэлемента и повысить его добротность. Получено выражение для предельной величины добротности с учетом температурного интервала изменения проводимости термисторных ветвей как в симметричном, так и в несимметричном виде.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (Физматтех), подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии», задание 2.12

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Институт термоэлектричества. — Киев — Черновцы. — 2003
2. Дмитриев А.В., Звягин И.П. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов // УФН. — 2010 (180), № 8, 821—838
3. Бохан Ю.И., Лалетин В.М., Сарасеко М.Н. Электропроводящие металлокерамические композиционные материалы: получение и свойства // Конструкционные и функциональные материалы. Конструкции из композиционных материалов. — 2014, № 3, 21—27
4. Шнеллер А. Термисторы/Аморфные и поликристаллические полупроводники / Под ред. В. Хейванга. — М.: Мир. — 1987, 75—100
5. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. — М.: УРСС. — 2003

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ ИНТЕРЬЕРОВ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

С.Н. Бухаров, А.С. Тулейко

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
AnastasiaXmara@gmail.com

В числе основных причин повышенного шума машин являются несовершенство конструкции, обусловленные погрешностями при проектировании узлов и агрегатов, их компоновке, которая выполняется без учета их виброакустических характеристик. Немаловажным фактором в формировании высоких уровней шума в кабинах является низкое поглощение шума панелями интерьера при высокой площади остекления кабины. Это приводит к образованию стоячих волн, усиливающих уровень шума на низких и средних частотах. В настоящее время звукопоглощающие композиты на основе природных и полимерных волокон являются основным материалом, используемым ведущими мировыми производителями автомобилей в качестве вибро- и шумопоглощающих деталей интерьеров и подкапотного пространства машин.

В ИММС НАН Беларуси разработаны звукопоглощающие композиционные материалы на основе льняных и полимерных волокон (рис. 1) и изделия из них шумопонижающие панели для интерьеров тракторов «Беларус» (рис. 2).

Основным экологическим преимуществом разработанных материалов является частичная биоразлагаемость и переход материала из объемной монолитной в сыпучую волокнистую форму, что существенно упрощает его утилизацию.



Рис. 1. Разработанные звукопоглощающие композиционные материалы

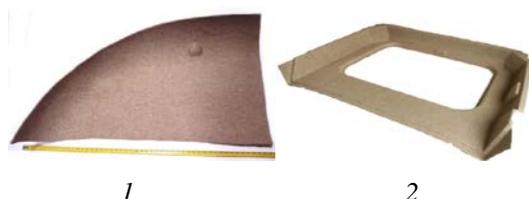


Рис. 2. Образцы деталей интерьера из разработанных звукопоглощающих композитов: 1 — деталь обшивки колесных ниш кабины трактора «Беларус»; 2 — потолочный элемент кабины трактора «Беларус»

Для исследования частотных зависимостей коэффициентов звукопоглощения многослойных структур применен разработанный в ИММС НАН Беларуси программный пакет и экспериментальное оборудование производства компании Брюль и Кьер.

Исследования по определению величины внутреннего шума на рабочем месте водителя транспортных средств проводили в кабине колесного трактора «Беларус 1523В», предназначенного для выполнения различных транспортных и сельскохозяйственных работ общего назначения.

Исследования внутреннего шума на рабочем месте водителя выполнялись: на стоянке при работе двигателя и его агрегатов в режиме, формирующем максимальную внешнюю виброакустическую нагруженность кабины; при движении трактора на максимальной транспортной скорости без нагрузки в режиме работы, формирующей суммарную (двигателем и трансмиссией) внешнюю виброакустическую нагруженность кабины.

На основании анализа экспериментальных данных по уровням внутреннего шума на рабочем месте водителя, выявлено, что при установке опытных образцов шумопонижающих деталей интерьера тракторов, изготовленных из звукопоглощающего композита на основе льняных и полимерных волокон, снижение уровней шума в диапазоне частот 500—2000 Гц на рабочем месте в кабине трактора составило 3—5 дБ. Как показано на рис. 3, уменьшение шума происходит практически во всем диапазоне частот, при этом за счет звукопоглощения снижение уровней звукового давления происходит в основном в средне- и высокочастотном диапазонах.

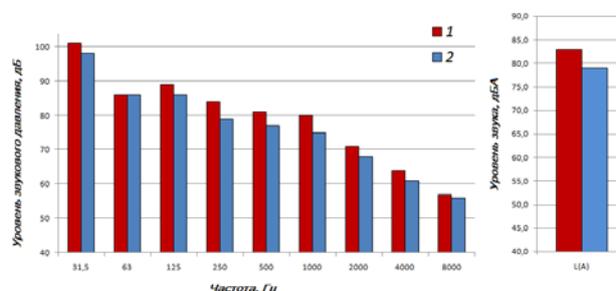


Рис. 3. Уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот и уровни звука $L(A)$, дБА, и полученные в режиме движения трактора на максимальной транспортной скорости: 1 — с серийными деталями колесных ниш; 2 — с деталями из разработанных звукопоглощающих композитов

ПОГЛОТИТЕЛИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО И СВЧ ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.С. Винидиктова¹, В.А. Банний², А.И. Савицкий²,
Л.И. Краморева², Е.С. Петрова², Д.Б. Куликович²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь
²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; bannui@tut.by

Введение. Применение радиопоглощающих материалов (РПМ) на объектах техники снижает эффективность их радиолокационного обнаружения и распознавания [1]. Наряду с радиолокацией, функционирующей в СВЧ-диапазоне, активно применяется оптическая локация с использованием лазерного излучения. В связи с этим, разрабатываемые РПМ и поглотители энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) должны быть малозаметными в оптическом диапазоне.

Цель исследований состояла в разработке поглотителей энергии ЭМИ оптического и СВЧ диапазонов на основе полимерных композиционных материалов и апробации способа локации объектов лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении пучка.

Объектами исследования служили листовые монолитные и волокнистые РПМ на основе полиэтилена (ПЭ, ГОСТ 16337-77, ГОСТ 16803-070). В качестве функционального наполнителя (ФН) использованы дисперсный магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС, размер частиц не превышает 200 мкм), стеклосферы (диаметр 200—500 мкм).

Результаты и обсуждение. При проведении технологических экспериментов ПЭ-связующее механически смешивали с ФН и подвергали гранулированию на экструзионной линии. Листовые монолитные РПМ формировали методами термического прессования, волокнистые РПМ в виде нетканых полотен — методом экструзии с пневматическим напылением полимерного расплава на формообразующую подложку [2]. Полимерные композиционные РПМ изготовлены в соответствии с принципами размерно-рецептурной и структурной оптимизации [3] и обладают высокими радиофизическими параметрами (коэффициент отражения от поверхности материала — 5—15%, ослабление энергии ЭМИ — 12—20 дБ), которые оценивали рефлектометрическим методом в волноводных трактах измерителей коэффициента стоячей волны и ослабления в диапазоне частот 2—27 ГГц при нормальном падении электромагнитной волны (ЭМВ).

Для определения коэффициента отражения ЭМВ в оптическом диапазоне собрана экспериментальная установка [4], состоящая из гелий-неонового лазера ЛГН-207, коллиматора, фотодиодного датчика, микропроцессорного устройства для обработки сигнала с фотодатчика и последующей

передачей цифрового сигнала на ПЭВМ (рис. 1). Для отображения интенсивности сигнала в режиме реального времени разработано программное обеспечение.

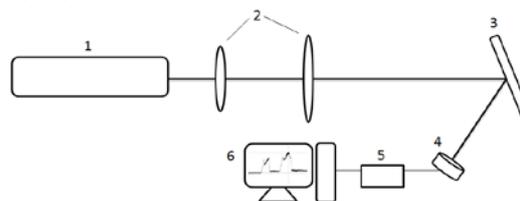


Рис. 1. Экспериментальная установка оптической локации: 1 — лазер ЛГН-207, 2 — коллиматор, 3 — исследуемый образец, 4 — фотодатчик, 5 — микропроцессорное устройство, 6 — ПЭВМ

Коллимированный лазерный пучок, имеющий гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении, падает на исследуемый объект и после отражения направляется на оптический датчик. Микропроцессорное устройство (на базе микропроцессора Atmega 128) с помощью аналого-цифрового преобразователя конвертирует сигнал в цифровой и передает его по протоколу RS-232 на ПЭВМ. Программное обеспечение интерпретирует полученные данные и отображает их в графическом виде в режиме реального времени как интенсивность излучения, падающего на фотодатчик.

Показано, что при нормальном падении излучения лазера ($\lambda = 630$ нм) на поверхность монолитных композиционных образцов РПМ, наблюдается достаточно устойчивое во времени отражение ЭМИ. Это приводит к «заметности» объекта в оптическом диапазоне. Напротив, волокнистые нетканые РПМ, за счет структуры и высокой степени наполнения ПЭ-волокон ФН, являются эффективными поглотителями энергии ЭМИ в СВЧ и оптическом диапазонах.

1. Макаревич А. В., Банний В. А. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ // МТИ. — 1999 (4), № 3, 24–32
2. Гольдаде В. А., Макаревич А. В., Пинчук Л. С. и др. Полимерные волокнистые melt-blown материалы. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2000
3. Банний В. А., Макаревич А. В., Пинчук Л. С. Влияние размерных и рецептурных параметров полимерных композитов на их радиофизические характеристики // Доклады НАН Беларуси. — 2000 (44), № 4, 109—111
4. Патент РБ 9028. Передающая оптическая система лазерного радара / Краморева Л. И., Савицкий А. И. МПК G02F. Оpubл. — 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИБРИДНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Н.С. Винидиктова¹, Е.Ф. Кудина¹, О.А. Ермолович²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, Гомель, Беларусь; vns_ins@mail.ru

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Введение. Один из эффективных способов увеличения долговечности металлических конструкций — применение защитных покрытий. Наиболее перспективным направлением является применение материалов на основе органических полимеров или олигомеров, способных полимеризоваться при отверждении. Полимерные материалы по сравнению с другими материалами обладают рядом преимуществ: хорошая водостойкость, большой срок службы, высокая адгезия, стойкость к действию воды, щелочей, кислот и ионизирующих излучений, малая пористость. Однако, несмотря на это, полимерные изоляционные покрытия со временем теряют свойства и требуют замены, поэтому проблемы обеспечения долгосрочной защиты поверхности остаются актуальными и требуют решения [1—3].

Цель данной работы — исследовать влияние синтезированного гибридного наполнителя эпоксисиликата металлов на свойства защитного материала на основе эпоксидного связующего.

Материалы и методы

Объектом исследования являются материалы и покрытия на основе эпоксидной смолы (ЭС) — ЭД-20. Для отверждения составов использовали отвердитель полиэтиленполиамин, содержание которого рассчитывали от количества ЭС. В качестве модификаторов ЭС применяли эпоксисиликаты (ЭСС) — синтетические продукты, полученные из водного раствора силиката натрия, модифицированного эпоксидиановой смолой. В гибридную матрицу интеркалированы металлы (Fe, Cu или Co). Дисперсность порошка: 25—50 нм (80%).

В качестве металлической подложки для покрытий использовали сталь марки Ст.3. Обязательной стадией очистки стальных поверхностей являлась абразивно-струйная обработка.

Все образцы отвержденных композиций до проведения испытаний выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 7 сут.

Определение прочности адгезионного соединения покрытие/металл проводили по методу решетчатых надрезов (ГОСТ 15410). Деформационно-прочностные характеристики блочных образцов (цилиндров) проводили по стандартной методике (ГОСТ 4651) на испытательной машине Instron (США).

Результаты и обсуждение

В работе в качестве ЭС использовали два состава: 1) эпоксидная смола ЭД-20, 2) эпоксидная

смола ЭД-20, модифицированная фенольным лаком (ЭСФ). Проведены исследования свойств полученных композиций. Установлено, что образцы из ЭС разрушаются при деформации 6—6,5%, а образцы из ЭСФ при 40% (рис. 1). Отмечена способность образцов из ЭСФ восстанавливать первоначальный размер, что свидетельствует о более высокой упругости материала в сравнении с образцами на основе исходной ЭС.

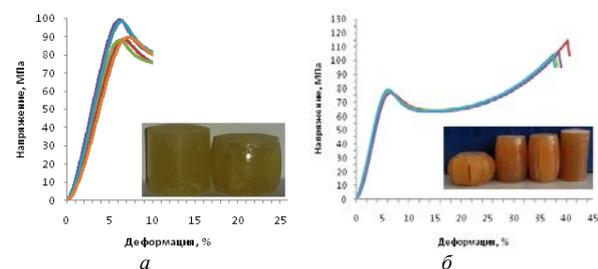


Рис. 1. Фото и диаграмма зависимости напряжения от деформации при сжатии образцов из исходных ЭС (а) и ЭСФ (б)

Исследовано влияние ЭСС на физико-механические характеристики композитов. Отмечено, что введение в состав связующего ЭСС приводит к увеличению показателей механических характеристик. Установлено, что введение силикатсодержащих наполнителей в ЭСФ связующее приводит к повышению адгезионной прочности покрытия к металлической подложке (рис. 2).

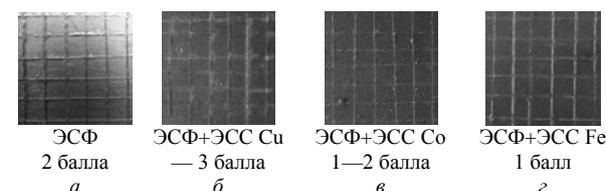


Рис. 2. Результаты испытаний адгезионной прочности образцов по методу решетчатых надрезов

Анализ полученных данных показал, что по эффективности улучшения свойств материалов на основе реактопласта ЭСС можно расположить в ряд: (ЭСС Cu)→(ЭСС Co)→(ЭСС Fe).

1. Кудина Е.Ф. Защита газо-нефтепроводов от внешних повреждений. Часть 1. Полимерные материалы (обзор) // Нефтяник полярья. — 2013, № 2 (24) — 88—93.
2. Мустафин Ф., Кузнецов М., Васильев Г. Защита трубопроводов от коррозии. Т. 1. — СПб: Недра — 2005
3. Транспорт Беларуси: основные этапы развития / Н.Г. Кучевский // Экономическим органам Беларуси 80 лет: материалы докл. республ. НПК, в 2 т. — Мн.: НИЭИ Минэкономики Республики Беларусь. — 2001

УСАДКА И КОРОБЛЕНИЕ АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ ТЕРМОПЛАСТОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПО ЭКСТРУЗИОННО-ПРЕССОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.А. Герасименко

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; gerasimenko_s@tut.by

Введение. Усадка и коробление, а соответственно и точность размеров пластиковых изделий зависят от ряда факторов. В первую очередь они определяются, термическим расширением и сжимаемостью, структурными изменениями, происходящими в результате структурообразования при охлаждении расплава полимерного материала. Форма и геометрические размеры изделия (толщина стенки, длина, наличие ребер жесткости и т. д.) являются не менее важными факторами при формировании усадки и последующего коробления изделия, так как оказывают влияние на процесс течения расплава в оформляющей полости, способствуют в разной степени ориентации макромолекул, определяют передачу давления в изделие. Величина усадки и коробление изделия зависит также от метода и технологических параметров процесса переработки полимерного материала [1].

Цель работы — анализ усадки и коробления аморфных и кристаллизующихся термопластов и отдельных композитов на их основе при их переработке по экструзионно-прессовой технологии.

Материалы и методы. В экспериментах использовали ПЭВП марки 277-73 производства ООО «Ставролен», ПП марки 01030 производства ОАО «Уфаоргсинтез», АБС-пластик марки 2802-31 производства ОАО «Узловая», а также смесевые композиты на их основе. В качестве модификатора применяли вспениватель (В) ADDITIVE 50200 производства ф. «Стомех» (Бразилия).

Композиты получали методом реакционной экструзии при использовании двухшнекового реактора-смесителя с односторонним вращением шнеков ($D = 35$ мм, $L/D = 40$).

Для изучения усадочных явлений, коробления, и получения образцов для определения показателей механических свойств использовали универсальную пресс-форму. Типы и характерные размеры получаемых образцов показаны на рис. 1 [2].

Результаты и обсуждение. На рис. 2 приведены значения продольной усадки для термопластов, а также композитов на их основе, содержащих 2 мас% вспенивателя, в зависимости от формы, размеров и конфигурации сечения образцов. Из графика видно, что на величину усадки значительное влияние оказывает толщина образца.

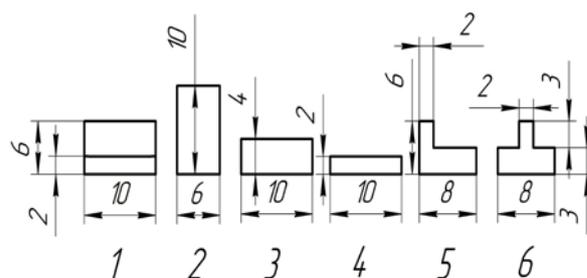


Рис. 1. Тип образца (1—6), и форма и характерные размеры сечения

Причиной этого является пониженная скорость охлаждения центральных слоев в более толстых образцах, что способствует более полному протеканию кристаллизационных и релаксационных процессов. В образцах, имеющих ребра жесткости возникают дополнительные внутренние напряжения вследствие различия во времени протекающих процессов охлаждения и уплотнения. Внутренние напряжения могут приводить к краткосрочному (без остаточных деформаций) или долгосрочному короблению в процессе последующей эксплуатации изделий.

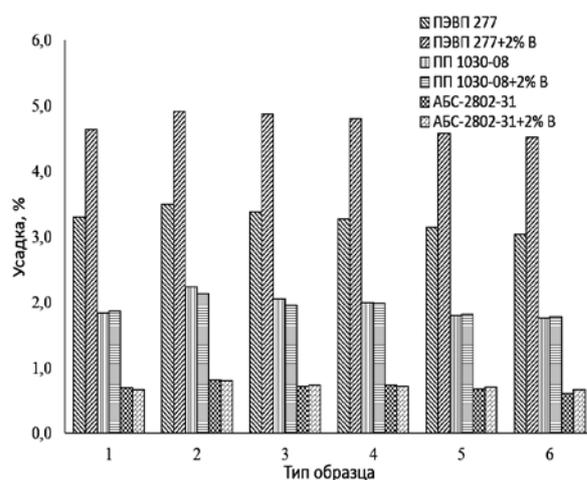


Рис. 2. Изменение продольной усадки в зависимости от типа образца

- Фишер Дж. М. Усадка и коробление отливок из термопласта. — СПб.: Профессия. — 2009
- Герасименко С.А., Песецкий С.С. О формуемости смесей ПП/ПЭ при экструзионно-прессовой переработке // Материалы. Технологии. Инструмент. — 2011 (16), № 3, 71—79

НОВЫЙ ХЕЛАТНЫЙ СОРБЕНТ ФИБАН ХС-1 ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ

В.И. Грачек, А.П. Поликарпов, А.А. Шункевич, Р.В. Марцынкевич, О.И. Исакович

Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь; grachek@ifoch.bas-net.by

Введение. В настоящее время производство подобных хелатных волокнистых ионитов организовано только в Японии. Корпорация Toray Inc. рекламирует волокно IONEКС с иминодиацетатными группами TIN 600, получаемое в результате проведения пяти основных стадий. Конечное волокно дорого, имеет статическую обменную емкость (СОЕ) $\sim 1,5$ мг-экв/г, невысокие механические характеристики и выпускается в небольших количествах (десятки — сотни граммов) для аналитических целей.

Цель работы — получить хелатный ионит с высокими обменной емкостью и механическими свойствами и исследовать его сорбционные свойства.

Материалы и методы. Матрицей для получения ионита является волокно полипропилена с привитым с ополимером стирола и дивинилбензола, которое хлорметилировали хлорсульфоновой кислотой. Далее хлорметилированное волокно обрабатывали диметилловым эфиром иминодиуксусной кислоты в течение 10 часов при температуре $65\text{—}70^\circ\text{C}$, с последующим омылением эфирных групп 3н раствором едкого натра. В результате получили иминодиацетатное волокно с высокими значениями СОЕ по карбоксильным группам от 3,2 до 4,0 мг-экв/г и механическими характеристиками, позволяющими перерабатывать волокнистый катионит в нетканое полотно. Синтезированный ионит назвали ФИБАН ХС-1.

Исследованы сорбционные характеристики катионита ФИБАН ХС-1 статическим и динамическим способом.

Изотермы сорбции ионов металлов получены методом отдельных навесок в статических условиях на смешанной водородно-натриевой форме ионита ФИБАН ХС-1 (рис. 1). Перед экспериментом образцы волокнистого ионита приводили в равновесие с 1М раствором NaCl или NaNO₃, pH которого откорректировано до определенного значения (5,0—5,5). Изотермы сорбции имеют резко выраженную крутизну в начале кривой при низком содержании металлов и четко выраженный линейный участок при концентрации меди не превышающей $1 \cdot 10^{-3}$ концентрации свинца до $2 \cdot 10^{-3}$ и концентрации никеля до $5\text{—}6 \cdot 10^{-3}$ мг-экв/л. Анализ полученных изотерм показывает, что сорбционная емкость катионита по отношению к ионам исследуемых металлов убывает в следующем ряду: $\text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$. Исследование кривых позволяет отметить, что ФИБАН ХС-1 количественно извлекает ионы металлов из воды в широком интервале концентраций.

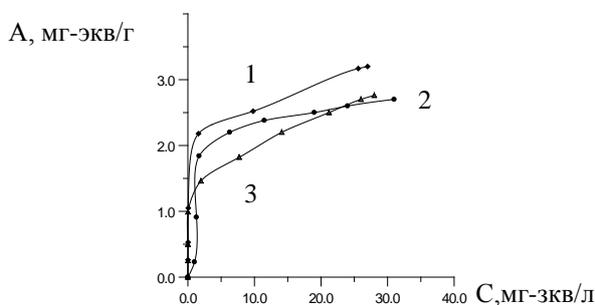


Рис. 1. Изотермы сорбции: 1 — Cu, 2 — Pb, 3 — Ni.

Сорбционную активность ФИБАН ХС-1 в динамических условиях изучали из многоионного модельного раствора, содержащего соли металлов: CuCl₂, NiCl₂, CoCl₂, ZnCl₂, CdCl₂, Pb(NO₃)₂ в концентрации $2 \cdot 10^{-2}$ ммоль/л на фоне 2 ммоль/л CaCl₂. Ряд избирательности ионов в динамическом режиме в выбранных условиях для ФИБАН ХС-1 имеет следующий вид: $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni} \geq \text{Zn} > \text{Co}$.

Результаты и обсуждение. Самую высокую сорбционную активность ФИБАН ХС-1 проявляет к ионам Pb^{2+} и Cu^{2+} , поэтому были проведены исследования сорбционных свойств сорбента по отношению к этим ионам при различных скоростях потока очищаемой воды от 2 до 40 колоночных объемов в минуту. Сорбцию проводили из водопроводной воды при концентрациях меди в воде 0,06 мг/л, свинца 0,1 мг/л. Исследования показали, что при относительно невысоких скоростях потоков (время контакта с потоком воды 30 с) ФИБАН ХС-1 обеспечивает по меди 98%-ную, по свинцу 93%-ную очистку воды. С увеличением скорости потока, степень очистки падает, но волокно работает и при больших скоростях до 20 колоночных объемов/мин (82%-ная очистка по Cu^{2+} и 65%-ная очистка по Pb^{2+}).

Найдено, что волокнистый хелатный ионит ФИБАН ХС-1 легко регенерируется и не теряет свои сорбционные и механические свойства в циклах сорбция — регенерация в динамике.

Таким образом, получен новый ионит ФИБАН ХС-1, который обладает высокой сорбционной активностью, хорошими кинетическими свойствами и удобной формой для извлечения тяжелых и цветных металлов. Ионит получен на матрице, которая выдерживает повышенные температуры и агрессивные среды, поэтому ФИБАН ХС-1 перспективен для использования в фильтрах для очистки питьевой и технической воды при повышенной температуре и в агрессивных средах.

ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ТРЕКИНГОСТОЙКОСТЬ ПА6, МОДИФИЦИРОВАННОГО СИНЕРГИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ АНТИПИРЕНОВ

А.А. Давыдов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
davidov_aa@tut.by

Введение

Безгалогенные, экологически безопасные огнестойкие композиты на основе полиамида 6 (ПА6) могут быть получены при совмещении в расплаве каталитически активных металлсодержащих веществ с соединением сим-триамина [1, 2]. Относительная легкость и экономическая выгода их производства предопределяют необходимость проведения исследований по анализу влияния состава на огнестойкость и другие технические характеристики, важные для принятия решения о практическом применении материалов.

Цель работы — изучение влияния состава синергических смесей безгалогенных антипиренов (АП) на огнестойкость и трекинговость, а также механические характеристики композитов на базе ПА6.

Материалы и методы

Базовым материалом служил ПА6 210/310 производства ОАО «Гродно Азот». В качестве АП использовали синергические смеси производных сим-триамина с нанодисперсными металлсодержащими соединениями, которые не содержат в своем составе атомов галогенов и фосфора и являются экологически безопасными (ТУ РБ 400084698.063-2004) и дополнительно добавки, препятствующие каплепадению (ДПК).

Компаундирование огнестойких материалов в виде гранул осуществляли в расплаве ПА6 при использовании экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 с односторонним вращением шнеков (диаметр шнеков 35мм; L/D = 40).

Полученный гранулят высушивали до остаточной влажности не более 0,15% и использовали для изготовления стандартных экспериментальных образцов: лопаток для испытаний на растяжение (ГОСТ 11262); брусков размером 80×10×4 мм для определения категории стойкости к горению (ГОСТ 28157), ударной вязкости по Шарпи (ГОСТ 4647) и кислородного индекса (ГОСТ 21793); дисков диаметром 50 мм и толщиной 3 мм для определения сравнительного индекса трекинговости по СТБ ИЕС 60112.

Результаты и обсуждение

Показатели свойств огнестойких полиамидных материалов приведены в табл. 1, из которой видно что, стойкость к горению, трекинговость и показатели механических свойств определяются составом и концентрацией АП. Введение в ПА6 АП совместно с ДПК позволяет обеспечить высшую категорию стойкости к горению при пониженной концентрации (15%) базового антипирена. Все материалы обладают высокой трекинговостью, что связано с отсутствием в их составе гидрофильных наполнителей, и возможностью формирования гладкой с высокой чистотой поверхности.

Таблица 1. Показатели свойств полиамидных материалов

Материал	КГ	σ_p , МПа	ϵ_p , %	a, кДж/м ²	I, В	КИ, %
ПА6	Горит	56 [□]	83	n/p (7,4)	—	19,3
ПА6+15%АП	ПВ-2	52	11	49	600	27,6
ПА6+21%АП	ПВ-0	47	9	45	525	32,2
ПА6+15%АП+1%ДПК	ПВ-2	53	10	48	600	29,2
ПА6+15%АП+3%ДПК	ПВ-0	55	10	47	600	33,1

Примечания: КГ — категория стойкости к горению; σ_p — прочность при разрыве (□ — верхний предел текучести); a — ударная вязкость по Шарпи без надреза, в скобках с острым надрезом; ϵ_p — относительное удлинение при разрыве; n/p — не разрушается; I — сравнительный индекс трекинговости; КИ — кислородный индекс.

Огнестойкие ПА композиты, содержащие в своем составе синергические смеси АП на основе соединений сим-триамина, перспективны для промышленного применения в частности при изготовлении изделий электротехнического назначения, обладающих повышенной трекинговостью.

1. Pesetskii S.S., Jurkowski B., Davydov A.A., Krivoguz Y.M., and Bogdanovich S.P. Metal-Polymer Nanocomposites Produced by Melt-Compounding: Interaction of Aliphatic Polyamide with Metal Particles // J. Applied Polymer Sci. — 2007 (105), № 3, 1366—1376
2. Песецкий С.С., Юрковский Б., Давыдов А.А. Полиамидные композиты пониженной горючести: разработки и перспективы исследований // Тезисы докл. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. «Реактив-2010», 27—29 октября 2010 г., г. Минск. —2010, 110

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПОЛИМЕРНОГО БИОРАЗЛАГАЕМОГО КОМПОЗИТА, ПОДБОР УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И КОМПАТИБИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕНТЫ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

О.В. Давыдова¹, Н.Е. Дробышевская¹, Е.Н. Подденежный¹, А.А. Бойко¹, В.М. Шаповалов²

¹Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
olga_davidova-uretskaya@mail.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Цель — разработка новых составов полимерного биоразлагаемого композита на основе смеси кукурузного крахмала и полиолефинов, подбор компатибилизаторов и ультрадисперсных наполнителей для формирования однородной ленты.

Экспериментальная часть

Разработаны составы экспериментальных образцов порошковых прекурсоров биоразлагаемых полимеров на основе кукурузного крахмала и компатибилизаторов (совместителей) — алюминатного агента, малеинового ангидрида, полиэтилена с привитым малеиновым ангидридом в смеси с минеральными наполнителями и полипропиленом. Апробирована методика изготовления экспериментальных образцов в форме гранул на двухшнековом экструдере и ленты на одношнековом экструдере с использованием совместителей синтетических и природных полимеров.

Разработаны основные этапы технологической схемы изготовления биоразлагаемого пластика с использованием холодного смешивания компонентов, включая малеинированный полиэтилен для получения ленты. В качестве основных ингредиентов для получения ленты были использованы: кукурузный крахмал, в качестве биоразлагаемого природного компонента, и синтетические полимеры — полипропилены PP H080 GP/2, PP H032 TF/2, полиэтилен малеинированный PE-g-МАН, этиленвинилацетат марки EVA и модифицирующие добавки.

С использованием техники горячего смешивания ингредиентов изготовлены серии экспериментальных образцов биоразлагаемых материалов. Для совмещения синтетического и природного полимеров использовали этиленвинилацетат с содержанием винилацетата около 12%. В качестве основных ингредиентов для получения ленты были использованы: кукурузный крахмал (РФ) в качестве биоразлагаемого природного компонента и синтетический полимер — полипропилен гранулированный PP H120 GP/3 (РФ) (рис. 1). В качестве ультрадисперсного наполнителя, придающего композиционному материалу белый цвет, был использован порошок диоксида титана. Испытания на биоразлагаемость в гумусе в течение 40 и 100 дней при температуре 25 °С и влажности 50—80% показали частичное разложение образцов. Проведены испытания полученных образцов ленты на относительное удлинение

и разрыв.

Заключение

1) Разработаны основные этапы технологической схемы изготовления биоразлагаемого пластика с использованием холодного и горячего смешивания компонентов, включая малеинированный полиэтилен для получения ленты на одношнековом экструдере.

2) Предложены модели встраивания зерен крахмала (TPS) и компатибилизатора в матрицу полиолефина при введении сэвилена и при добавлении малеинированного полиэтилена PE-g-МАН. Показано, что использование PE-g-МАН приводит к более однородному распределению крахмала в матрице синтетического полимера.

3) Показано, что использование в качестве полиэтилена малеинированного PE-g-МАН приводит к большей механической прочности ленты в продольном направлении. Кроме того, относительное удлинение при разрыве образцов, полученных с использованием малеинированного полиэтилена значительно меньше, чем у стандартной ленты биопластика (Китай). Это связано, по-видимому, с недостаточной гомогенизацией расплава композита в одношнековом лабораторном экструдере.

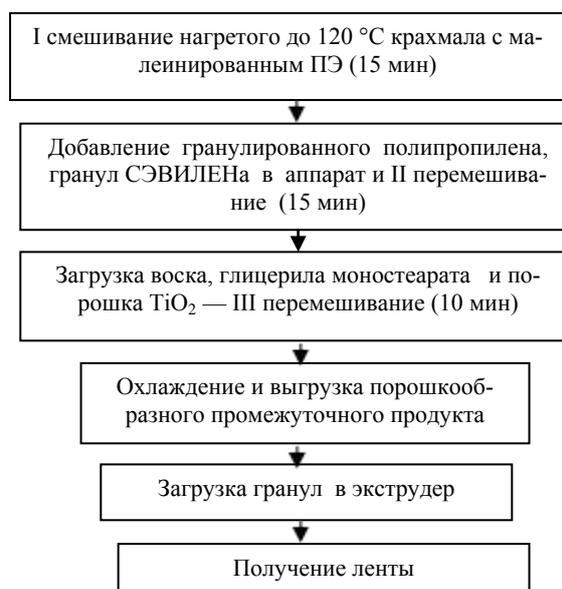


Рис. 1. Схема получения полимерного биоразлагаемого композита

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ НА ВЯЗКОСТЬ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

Р.М. Долинская, Н.Р. Прокопчук

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; raisa_dolinskaya@mail.ru

Введение. В настоящее время в качестве одного из основных методов регулирования технологических и эксплуатационных свойств резиновых изделий является широкое применение в рецептуре резиновых смесей модификаторов.

Цель — изучение влияния модификаторов на свойства резиновых смесей для получения изделий методом инъекционного литья.

Материалы и методы. Исследование влияния различных модификаторов вязкости проводили для резиновых смесей на основе БНКС-18АМН и БНКС-28АМН — сополимеров бутадиена и нитрила акриловой кислоты 18% и 28% соответственно. Состав вулканизирующей группы выбран таким образом, чтобы обеспечить безопасность переработки смеси и оптимальную структуру вулканизационной сетки, а также для обеспечения требуемого комплекса физико-механических свойств резиновой смеси. В качестве модифицирующих добавок в работе исследовались 2 типа модификаторов различной природы: Низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ); Dispergator FL. НМПЭ является побочным продуктом производства полиэтилена. НМПЭ улучшает реологические характеристики резиновой смеси и способствует улучшению ее текучести. Dispergator FL — гранулированная технологическая добавка на основе комбинации металлического мыла, спиртов и жирных кислот. Известно [1], что при добавлении Dispergator FL существенно улучшается текучесть резиновой смеси при переработке ее в изделия методом экструдирования, каландрования, трансферного прессования или литья под давлением. Также Dispergator FL играет роль внутренней и внешней смазки, положительно влияя на извлекаемость формуемых деталей из формы.

Опытные образцы эластомерных композиций изготавливали на лабораторных вальцах ЛВ 320 160/160 при постоянном охлаждении валков; вулканизацию проводили в гидравлическом прессе при температуре 143 ± 3 °С. Вулканизационные характеристики резиновых смесей изучали методом вибрационной реометрии на вибрационных реометрах «Монсанто MDR-2000».

Результаты и обсуждение. Применение модификатора Dispergator FL обеспечивает незначительное снижение вязкости резиновых смесей, (на 1—4 единицы) как на основе каучука БНКС-18АМН, так и на основе каучука БНКС-28АМН по сравнению с композициями, не содержащими модификатор, что

вероятно не окажет влияния на улучшение переработки эластомерной композиции. Применение модификатора НМПЭ уменьшает показатель вязкости на 8—12 единиц, что вероятно окажет положительное влияние на улучшение литьевой способности резиновых смесей. Вероятно, это связано с тем, что исследованные модификаторы способствуют созданию гетерогенной вулканизационной структуры, сохраняя гомогенную среду при введении модификаторов. Известно, что в эластомерные композиции модификаторы вводятся в дозировках от 1,00 до 4,00 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука [2]. Поэтому следующим этапом наших исследований было подбор дозировки модификатора НМПЭ и разработка рецептуры эластомерной композиции на основе каучуков БНКС-18АМН, БНКС-28АМН для изготовления на ее основе уплотнительных РТИ методом инъекционного литья. Применение модификатора в количестве 1,00 мас.ч. обеспечивает незначительное снижение вязкости резиновых смесей относительно исходного варианта: на 1—2 единицы, что не окажет влияния на улучшение переработки эластомерной композиции. Применение НМПЭ в дозировках от 2,00—4,00 мас.ч. уменьшает показатель вязкости на 6—12 единиц, что оказывает положительное влияние на улучшение литьевой способности резиновых смесей. Время подкулканизации резиновых смесей и скорость вулканизации при использовании НМПЭ изменяются незначительно в дозировках от 1,00 до 2,00 мас.ч. относительно образца без технологической добавки, а при введении модификатора в количестве 3,00—4,00 мас.ч. снижается скорость вулканизации.

В результате исследования было выявлено, что наилучший комплекс эксплуатационных свойств достигается при использовании в рецептурах резиновых смесей модификатора НМПЭ в количестве 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука. Вероятно, низкомолекулярные полимеры лучше распределяются и совмещаются с каучуками, поэтому модификатор НМПЭ оказывают большее влияние на изменение вязкости резиновых смесей. Кроме того, НМПЭ производится в Беларуси.

1. Дьяконова Л.М. Применение технологически активных добавок в эластомерах // Каучук и резина. — 2007, № 3, 14—15
2. Технология резины: Рецептуростроения и испытания / под ред. Дж.С. Дика; с англ. под ред. В.А. Шершнева. — СПб.: Научные основы и технологии. — 2010

НОВЫЙ МОДИФИКАТОР МЕЛАМИНАЛКИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

О.А. Кротова, Е.В. Бобович, Е.Ф. Кудина, Э.Т. Крутько

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; OIja_2525@mail.ru

Введение. Для улучшения эксплуатационных характеристик и расширения областей применения меламиналкидных смол, они подвергаются модификации различными органическими и неорганическими реагентами [1,2].

Цель — исследование влияния нанодобавки неорганической природы на эксплуатационные свойства покрытий на основе меламиноалкидной смолы МЛ-0159 производства «Лида-лакокраска», Республика Беларусь.

Материалы и методы. Для модификации лака МЛ-0159 применялись наноразмерные частицы диоксида кремния, предварительно обработанные уксусной кислотой в количестве 0,1—0,3 мас.% от массы сухого остатка смолы. Приготовление пленкообразующих композиций осуществляли прямым введением диоксида кремния в смолу с последующим тщательным перемешиванием. Формирование покрытий осуществляли на поверхности металлических пластин из низкосортной стали марки 08кп при повышенных температурах.

Для полученных покрытий проводилось определение относительной твердости с помощью маятникового прибора по ISO 1522 и ГОСТ 2533-89; прочности при ударе с помощью прибора «Удар-Тестер» по ISO 6272 и ГОСТ 4765-73. Адгезия покрытия к стальной подложке определялась с помощью метода решетчатого надреза с обратным ударом по стандарту ISO 2409.

Результаты и обсуждение. Меламиноформальдегидные смолы отверждаются как за счет реакций гомоконденсации меламиноформальдегидных олигомеров, так и в результате взаимодействия их с другими олигомерами (гетероконденсация), которые присутствуют в композиции МЛ-0159 и содержат гидроксильные, карбоксильные, амидные или другие функциональные группы [3,4]. Поэтому при получении ЛКМ их используют в сочетании с алкидными смолами, ненасыщенными полиэфирами, полиакрилатами [1]. Возможно также протекание окислительной полимеризации алкидных олигомеров в системе исходной смолы [4].

В результате проведения данной работы было установлено, что введение в лак МЛ-0159 наноразмерных частиц диоксида кремния в количестве 0,1 и 0,3 мас.% незначительно влияет на изменение прочностных и адгезионных свойств формируемого защитного покрытия на субстратах из низкосортной стали. При увеличении содержания неорганического

модификатора свыше 0,3 мас.% эти характеристики существенно ухудшаются, практически не изменяясь при содержании модифицирующей добавки менее 0,1 мас.%. Следует отметить, что при содержании модификатора в количестве 0,2 мас.% в большей степени, чем при содержании наноразмерной добавки 0,3 мас.% увеличивается прочность покрытия и его твердость. Однако важно отметить, что проведенное изучение водостойкости покрытия, сформированного с использованием меламиналкидной смолы, модифицированной диоксидом кремния, обработанным уксусной кислотой, в количестве 0,2 мас.% от массы сухого остатка смолы, повышает коррозионную стойкость поверхности субстрата из низкосортной стали более чем вдвое. Так, коррозия пластины из низкосортной стали, защищенной покрытием, сформированным из исходной меламиналкидной смолы, визуально наблюдалась через 30 суток экспозиции в водной среде (при нормальных условиях), в то время как поверхность металла сохранялась без видимых признаков коррозии более чем через 70 суток в случае защиты ее композицией меламиналкидной смолы, содержащей 0,2 мас.% диоксида кремния, обработанного уксусной кислотой.

Заключение. Таким образом в процессе проведения данного исследования был обнаружен эффект антикоррозионного действия присутствующих в композиции меламиналкидной смолы нанодобавок диоксида кремния, обработанного уксусной кислотой в количестве 0,2 мас.% от массы сухого остатка смолы, при практически неизменных физико-механических свойствах формируемого защитного покрытия на субстратах из низкосортной стали.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта X16M-069).

1. Соломон Д. Г. Химия органических пленкообразователей. — М.: Химия. — 1971.
2. Мюллер Б., Пот У. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур. — М.: Пейнт-Медиа. — 2007.
3. Лещинская И. К., Шутова А. Л., Прокопчук Н. Р. Участие функциональных групп в реакциях пленкообразования эпоксисодержащих меламиноалкидных систем // *Материалы, технологии, инструменты.* — 2010 (15), № 1, 94—99.
4. Брок Т., Гротэклаус М., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. — М.: Пейнт-Медиа. — 2007

МОДИФИКАЦИЯ МЕЛАМИНОАЛКИДНОЙ СМОЛЫ БИЦИКЛИЧЕСКИМ ДИАГИДРИДОМ ЦИКЛОАЛИФАТИЧЕСКОЙ ТЕТРАКАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ

Э.Т. Крутько, Т.А. Жарская, Е.В. Бобович

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь; ela_krutko@mail.ru

Введение. Значительный научный и практический интерес представляют исследования по модифицированию крупнотоннажных промышленно-производимых полимеров реакционноспособными полифункциональными соединениями. Использование такого подхода позволяет существенно улучшить свойства многих промышленных полимеров и олигомерных композиций.

Цель — исследование возможности улучшения эксплуатационных свойств формируемых покрытий на основе промышленно-производимой меламиноалкидной смолы МЛ-0136, производимой в условиях ОАО «Лида-лакокраска» (Беларусь).

Материалы и методы. Модификацию лака МЛ-0136 проводили диангидридом бицикло/2,2,2/-окт-7-ен-2,3,5,6- тетракарбонической кислоты (ДАБЦО) путем введения в готовую смолу, нагретую до 80 °С рассчитанного на массу сухого остатка (51%) количества ДАБЦО (0,01—0,05 мас.%). Полученную олигомерную пленкообразующую композицию при перемешивании выдерживали в этих условиях 10 минут после чего охлаждали на воздухе и наносили на стальные подложки из низкосортной стали марки 08 КП методом полива через фильеру и отверждали в термокамере при 120—130 °С в течение 40—60 минут до степени отверждения 3. Необходимо отметить, что образцы с модифицированным покрытием отверждались быстрее, чем с немодифицированным во всем интервале исследованных температур. Причем образец с содержанием модификатора 0,05 мас.% и более отверждался медленнее, чем с содержанием ДАБЦО 0,01—0,03 мас.%. Адгезия и прочность покрытия при ударе для всех образцов оказалась сравнимой.

Результаты и обсуждение. Экспериментально установлено, что в интервале концентраций модификатора от 0,01 мас.% до 0,03 мас.%, относительная твердость покрытия значительно возрастает по сравнению с немодифицированным покрытием.

Следовательно, можно заключить, что небольшое содержание ДАБЦО (до 0,03 мас.%) увеличивает твердость и уменьшает время отверждения покрытия, то есть оказывает каталитическое действие

на процесс структурирования в системе полифункциональных сложноэфирных и меламиноформальдегидных олигомеров. Однако при добавлении большего количества модификатора происходит резкое снижение твердости. Вероятно, это объясняется тем, что при содержании ДАБЦО в композиции от 0,01 мас.% до 0,03 мас.% модифицирующий компонент равномерно распределяется в массе смолы, вступая в химическое взаимодействие с концевыми гидроксильными группами сложного насыщенного олигоэфира (основа алкидной смолы) и спиртовыми и аминогруппами меламиноформальдегидной составляющей смолы МЛ-0136, а сшивка таким образом фрагментированных ДАБЦО макромолекул олигомеров с образованием трехмерной пространственной структуры происходит в процессе формирования покрытий путем нагревания их при повышенных температурах (120—130 °С) в термокамере. При добавлении же большего количества модификатора частичная сшивка, по-видимому, происходит уже при нагревании самой смеси олигомеров с модифицирующей добавкой диангидрида бициклической тетракарбонической кислоты до 80 °С так как смола начинает желатинизироваться, причем при нанесении композиции на подложку покрытие получается неравномерным (разнотолщинным). Следовательно, оптимальной концентрацией ДАБЦО в пленкообразующей композиции меламиноалкидного лака марки МЛ-0136, обеспечивающей улучшение твердости формируемого лакокрасочного покрытия при сохранении высоких значений прочности при ударе и адгезионных характеристик, является содержание его в количестве от 0,01 до 0,03 мас.%.

Таким образом, возможность снижения температуры и продолжительности формирования защитных покрытий с использованием лака

МЛ-0136, модифицированного ДАБЦО, обеспечивает уменьшение энергозатрат, удешевление технологического процесса создания защитных покрытий на субстратах из низкосортной стали, увеличив срок службы мелаллоизделий и конструкций.

СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Е.Ф. Кудина^{1,2}, Н.С. Винидиктова¹, О.А. Ермолович²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; kudina_mpri@tut.by

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Введение. Несмотря на широкий спектр составов покрытий, применяемых в современной технике, использование эпоксидных смол и материалов на их основе остается актуальным, особенно когда покрытия должны быть устойчивы к колебаниям температур, влажности, агрессивным средам и др. Высокие требования предъявляются также к повышению адгезионной прочности покрытия. Интерес представляют и составы, обеспечивающие покрытию специальные свойства (градиентное распределение плотности и твердости по толщине покрытия, отражающие свойства и др.).

Цель. Одним из направлений совершенствования составов на основе эпоксидных смол является изучение влияния минеральных наполнителей на физико-механические характеристики покрытий с целью повышения их защитных свойств.

Материалы и методы. Объектом исследования являются покрытия, формируемые на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и комбинированной матрицы, полученной при функционализации эпоксидной смолы органическими олигомерами. Отвердителем являлся полиэтиленполиамин. В качестве наполнителей исследовали силикатсодержащие порошки: серпентинит, монтмориллонит, каолин, цеолиты и синтезированные гибридные продукты («эпоксисиликаты» железа, меди или кобальта). Покрытия из композиций получали на стали марки Ст.08кп методом: холодного отверждения или при термическом воздействии. Поверхность стальной подложки подвергали пескоструйной обработке. Характеристики покрытий определяли по стандартным методикам.

Результаты и обсуждение. Установлено, что распределение силикатсодержащих наполнителей в материалах, полученных на основе реактопласта, зависит от типа наполнителя и метода его введения. Показано, что модифицирование эпоксидной смолы повышает прочность отвержденного реактопласта до 33%, модуль упругости до 12% и твердость до 2,3 раз. Наиболее эффективными наполнителями являются «эпоксисиликаты» металлов.

Формирование комбинированной матрицы покрытия позволяет снизить хрупкость материала при увеличении адгезионной прочности соединения покрытие/сталь с 4,0 до 9,6 МПа, а модуль Юнга с 0,2 до 15,5 ГПа. Введение гибридных наполнителей в комбинированное связующее обеспечивает упрочнение материала до 20%. Для увеличения микро-

твердости покрытий наиболее эффективными наполнителями являются цеолиты и эпоксисиликаты железа (соответственно, на 18% и 16%).

Установлено, что введение в состав термореактивных смол гибридных наполнителей типа «эпоксисиликатов» металла, в поверхностном защитном слое распределены металлосодержащие компоненты. Обладая сложной структурной организацией, «металлоэпоксисиликатные» продукты могут под действием внешних факторов (атмосферных явлений, вибраций и др.) разрушаться, обеспечивая пролонгированное защитное действие эпоксидной или комбинированной матрицы.

Исследования звукопоглощающих свойств материалов покрытий показали, что силикатсодержащие наполнители повышают коэффициент затухания ультразвуковых колебаний. Установлено, что наиболее высокий коэффициент затухания ультразвуковых колебаний обеспечивает введение в состав полимерного связующего в качестве наполнителя цеолитов. Установлено, что введенные в реактопласт цеолиты при формировании отвержденного покрытия распределяются градиентно в объеме композита (рис.). Градиентное изменение концентрации наполнителя по толщине покрытия приводит к варьированию плотности, коэффициента затухания, твердости, плотности от основания к поверхности. Микротвердость образцов варьируется до 18%.



Рис. Распределение цеолитов по толщине покрытия на основе эпоксидной смолы

Определены наполнители, позволяющие при введении в состав покрытия наиболее эффективно снизить сорбцию агрессивных сред и обеспечить пролонгированную защиту материала от разрушения. Введение наполнителей приводит к снижению сорбции связующего от 8 до 50% в зависимости от природы силикатсодержащего продукта.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т15-102).

ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ ИНГИБИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ IRGANOX 1010 ПРИ ПРЕССОВОЙ ОБРАБОТКЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Е.М. Лапшина¹, Д.Г. Лин², Е.В. Воробьева², О.В. Конакова¹

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

Известно, что при формировании стабилизированного полимерного материала, предельное растворение (или совместимость) антиоксиданта в полимере достигается на стадии расплава материала. В итоге, чем лучше растворен (совмещен) антиоксидант в полимере, тем выше его ингибирующая способность. Можно предположить, что увеличение времени прессования могут способствовать растворению антиоксиданта, а, следовательно, и увеличению термоокислительной устойчивости полимера. Однако, при проведении предварительных исследований по влиянию дополнительной выдержки в прессе полимерных композиций, содержащих irganox 1010, мы получили обратный результат — снижение термоокислительной стойкости полученного материала. Поэтому целью работы явилось выявление причин снижения ингибирующей способности irganox 1010 при прессовой обработке полиэтилена.

Для исследования использовали порошкообразный нестабилизированный полиэтилен низкого давления (ПЭНД, ГОСТ 16338-85, марка 20306-005), в который вводили irganox 1010 (4-окси-3,5-дитрет-бутилпропионовой кислоты пентаэритритовый эфир). Введение антиоксиданта в полимер осуществляли с использованием растворителя (ацетон). Из полученных полимерных композиций методом термического прессования получали полимерные пленки толщиной 100 мкм. При проведении исследований использовали ИК-Фурье-спектрометр Vertex 70 (фирма Brüker, Германия) с термостатирующей приставкой P/N 21525 (термокувета). Спектры снимали во время термоиспытаний в режиме *in situ*, то есть без извлечения образца из термокуветы. Математическую обработку спектров проводили, используя пакет программ OPUS 6.0.

В процессе исследований использовали значения площадей полос поглощения в области 3640 см^{-1} (S_{3640}) и в области 1745 см^{-1} (S_{1745}), которые представляли собой величины пропорциональные суммарному количеству гидроксильных и карбонильных групп (в составе сложноэфирных), содержащихся в антиокислительной добавке. По данным площадей полос поглощения рассчитывали коэффициент K , который представлял собой отношение этих двух величин $K = S_{3640} / S_{1745}$. Физический смысл коэффициента заключается в том, что он выражает долю гидроксильных групп по отношению к карбонильным, т.е. он показывает уровень повреждения молекул ингибитора. Известно [1], что фенольные антиоксиданты, имеющие подвижный

водород в составе гидроксильной группы, уже на стадии индукционного периода реагируют с полимерными радикалами, ведущими цепи окисления. В результате водород от гидроксильной группы отрывается, окислительные цепи обрываются, а молекула антиоксиданта превращается в малоактивный радикал.

Установлено, что на стадии нагрева образца в ИК-спектрах постепенно нарастают площади полос поглощения S_{3640} и S_{1745} , что указывает на растворение антиоксиданта в полимере. При этом коэффициент K с ростом температуры снижается (рис.1, начальный участок кривой). С переходом образца во вторую стадию термообработки (расплав) значения коэффициента K снижаются существенно (примерно в 2 раза), что однозначно указывает на продолжающееся разрушение гидроксильных групп в составе ингибитора (рис.1, серединный участок кривой).

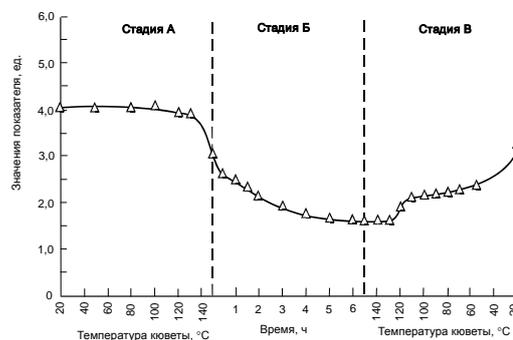


Рис. 1. Зависимость показателя K в процессе перевода образца из твердого в расплавленное состояние (нагрев — стадия А), изотермической термообработки в расплаве при 150 °C (стадия Б) и последующего перевода из расплавленного в твердое состояние (охлаждение — стадия В). Концентрация irganox 1010 в пленке $0,1\text{ мас.}\%$.

На стадии охлаждения образца отмечен рост значений коэффициента K — с 1,61 до 3,52 ед., т.е. относительная концентрация гидроксильных групп в составе фенольного антиоксиданта, увеличивается (рис. 1, конечный участок кривой). При этом исходных значений коэффициент K не достигает. Значит, в расплаве полиэтилена кроме процессов растворения, также протекают процессы разрушения антиоксиданта irganox 1010, которые приводят к снижению его ингибирующей способности.

1. Рогинский В.А. Фенольные антиоксиданты: реакционная способность и эффективность. — М.: Наука. — 1988

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СЕТЧАТЫЕ ПОЛИУРЕТАНЫ — ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕГОСЯ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Н.Н. Ласковенко, Е.В. Лебедев

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, Киев, Украина;
nilla.laskovenko@gmail.com

Введение. В данном сообщении приводятся результаты исследований синтеза, свойств и применения наноструктурированных пленкообразующих полиуретанов [1], которые рекомендуются к использованию как антикоррозионные защитные покрытия, герметики, инъекционные материалы.

Цель. Получение наноструктурированных полиуретанов путем модификации сетчатых полиуретанов наноструктурированными кремний-органическими олигомерами, исследование их свойств, применение

Материалы и методы. В качестве методов исследования использованы ИК-спектральный, рентгеноструктурный, дериватографический анализы, Готовские методы определения твердости, адгезии, прочности на разрыв и растяжение полимерных пленок, устойчивости покрытий в агрессивных средах.

Результаты и обсуждение. Для проведения модификации сетчатых полиуретанов (ПУ) на основе простых полиэфиров и ароматического полиизоцианата был использован наноструктурированный олигомер, полученный по золь-гель методу [2] — реакции гидролиз-сополиконденсации тетраэтоксисилана (ТЭОС) и фенилтриэтоксисилана (ФТЭОС) в кислой среде. Рентгеноструктурным, функциональным, дериватографическим анализами установлено, что олигомеры наноструктурированы, при соотношении ТЭОС: ФТЭОС 1:2 — содержание фенильных групп в олигомере составляет 12%, температура размягчения 130 °С, температура начала разложения (5%) — 300 °С. За счет хорошей растворимости и технологичной температуры размягчения олигомеры могут практически использоваться в качестве модификаторов полимеров. При введении в полиуретановую матрицу наноструктурированного кремнийсодержащего олигомера (ТЭОС — ФТЭОС) в количестве (0,1—0,5)% изменяются физико-химические и физико-механические свойства полимерной пленки: увеличиваются адгезия к металлу, относительная твердость (рис. 1) и прочность пленки при растяжении.

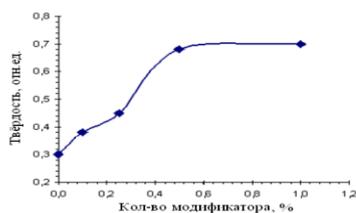


Рис. 1. Изменение относительной твердости ПУ пленки от содержания модификатора

Стойкость полиуретанового модифицированного покрытия возрастает в дистиллированной воде в 10 раз, в морской воде — в 2 раза, в щелочных средах и растворах солей — в 1,5—2 раза. Процент набухания в агрессивных средах незначителен (0,2—0,8), коэффициенты диффузии низкие.

Теплофизические исследования модифицированных ПУ покрытий (рис. 2) показывают, что они достаточно термостойки: процесс разложения начинается с температуры (251—253) °С и протекает в две стадии.

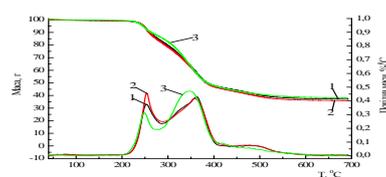


Рис. 2. Термогравиметрические кривые наноструктурированного ПУ-покрытия

Модификация наноструктурированным олигомером текучих полиуретановых инъекционных композиций различного типа показала [3], что основные физико-механические свойства модифицированных композиций не изменялись, в то же время возросла гидролитическая стабильность при исследовании в водных и агрессивных средах, что очень важно для эффективной и длительной эксплуатации инъекционных материалов и антикоррозионных покрытий на их основе в трещинах и повреждениях железобетонных сооружений.

Заключение. Модификация сетчатого полиуретанового полимера синтезированными органо-неорганическими олигомерами дала возможность получить наноматериалы с улучшенной водо-, и химической стойкостью, твердостью и прочностью при растяжении. Материалы могут быть рекомендованы как антикоррозионные покрытия, герметики, покрытия специального назначения.

1. Терещенко Т.А., Ласковенко Н.Н. Полімер-неорганічна композиція з уретан-вмісною фазою // Український хімічний журнал. — 2003 (69), № 10, 119—123
2. Кузнецова В.П., Ласковенко Н.Н., Омельченко С.И. Органо-неорганические полимеры, синтез и свойства // Композиционные, полимерные материалы. — 2000, № 2, 87—91
3. Маруха В., Галань І, Ласковенко Н., Волошин М., Середницький Я. Просторова і наноструктуровані кремнійорганічними модифікаторами поліуретанові ін'єкційні матеріали для протикорозійного захисту залізобетонних споруд // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2012, № 9, 550—555

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО СЫРЬЯ В ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

А.В. Лешкевич, Ж.С. Шашок

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь, nastyonke@mail.ru

Введение

Повышение экологической безопасности при изготовлении и эксплуатации резинотехнических изделий достигается путем исключения или сокращения материалов, выделяющих вредные вещества. В основном к таким материалам относятся целевые добавки (пластификаторы, мягчители) на основе продуктов переработки нефти, запасы которой ограничены. В связи с этим актуальным является исследование возможности применения в эластомерных композициях продуктов, полученных из вторичного нефтехимического сырья.

Цель работы — исследование влияния продукта переработки отработанного масла (ДВЧ) в сравнении с промышленным пластификатором И-40 на технологические и физико-механические свойства ненаполненных резиновых смесей на основе каучука СКИ-3.

Материалы и методы

Исследуемые добавки вводились в эластомерные композиции в дозировках 2,5, 5,0 и 10,0 мас.ч.

Исследуемый пластифицирующий компонент ДВЧ представляет собой продукт переработки отработанных масел (состава C_{25} — C_{29}), прошедший деметаллизацию, выпаривание и удаление легких фракций. Оба пластифицирующих компонента были модифицированы 1% полиизобутиленом (ПИБ).

Исследование пласто-эластических свойств эластомерных композиций с различными пластифицирующими компонентами выявило, что введение продукта переработки отработанного масла ДВЧ в различных дозировках не оказывает значительного влияния на вязкость по Муни резиновых смесей по сравнению с композициями, содержащими промышленный компонент И-40. Так, для резиновой смеси, содержащей 5,0 мас.ч. ДВЧ, данный показатель равен 13,1 усл.ед. Муни, а при введении И-40 в той же дозировке — 13,3 усл. ед. Муни.

Исследования кинетики вулканизации резиновых смесей на основе СКИ-3 показали, что эластомерные композиции, содержащие в качестве исследуемой добавки продукт переработки отработанного масла (ДВЧ) характеризуются несколько меньшим (на 3—8%) значением времени достижения оптимальной степени вулканизации. Так, для резиновой смеси, содержащей 2,5 мас.ч. ДВЧ, данный показатель составляет 7,63 мин., а при введении 2,5 мас.ч. И-40 — 8,23 мин.

Результаты и обсуждение

Под действием повышенных температур происходят необратимые изменения в структуре вулканизата, связанные с окислением полимерных цепей матрицы и образованием радикалов. Данный процесс характеризуется степенью изменения физико-механических показателей (условной прочности при растяжении σ_B и относительного удлинения при разрыве ϵ_B) эластомерных композиций (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические показатели резин на основе СКИ-3

Наименование введенного ингредиента	Количество введенного ингредиента	σ_B , %	ϵ_B , МПа
Исследуемый компонент ДВЧ	2,5 мас.ч.	790,0	16,8
	5,0 мас.ч.	800,0	16,1
	10,0 мас.ч.	850,0	14,4
Промышленный пластификатор И-40	2,5 мас.ч.	800,0	15,9
	5,0 мас.ч.	800,0	15,1
	10,0 мас.ч.	840,0	14,1

С целью определения стойкости резин к тепловому старению исследуемые вулканизаты были подвергнуты воздействию повышенной температуры в термостате в течение 72 и 120 часов при температуре 100 °С. Было выявлено, что использование в резиновых смесях исследуемого компонента ДВЧ в большей мере позволяет сохранить эластические и прочностные свойства резин по сравнению с композициями, содержащими промышленный пластификатор И-40. Так, коэффициент старения (после 72 часов старения) по условной прочности при растяжении вулканизатов, содержащих 10,0 мас.ч. ДВЧ, составляет 0,90, а при введении И-40 (в той же дозировке), данный показатель равен 0,79.

Заключение

Таким образом, результаты исследования свойств эластомерных композиций на основе СКИ-3 с продуктом переработки отработанного масла ДВЧ показали, что характер изменения свойств резиновых смесей не имеет значительных различий по сравнению с композициями, содержащими промышленный пластификатор — масло И-40. При этом следует отметить, что резины с пластифицирующим компонентом ДВЧ имеют несколько более высокую стойкость к тепловому старению.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОФИЛЬНО-ГИДРОФОБНОГО БАЛАНСА ПОВЕРХНОСТИ КАПИЛЛЯРНЫХ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ФУЛЛЕРЕНОЛА

Г.Б. Мельникова¹, Е.С. Любимова², Т.В. Плиско², А.В. Бильдюкевич²

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, galachka@gmail.com

²Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Для анализа гидрофильно-гидрофобных свойств поверхности, как правило, используют метод «неподвижной капли». В случае пористых материалов широко применяют методы прикрепленного пузырька и натекания — отека жидкости. Однако, при исследовании поверхности мембран данными методами имеются различия по полученным данным краевого угла смачивания, что связано с особенностями пористой структуры поверхности. Представляется интересным сравнить данные, полученные с использованием как микро-, так и макроскопических методов.

Цель — провести оценку гидрофильно-гидрофобных свойств поверхности капиллярных мембран с различным содержанием фуллеренола.

Материалы и методы. Тонкопленочные композиционные мембраны были получены при формировании тонкого полиамидного слоя методом межфазной поликонденсации при использовании в качестве подложки половолоконной ультрафильтрационной мембраны на основе полисульфона с типом фильтрации «изнутри-наружу», разработанной в ИФОХ НАН Беларуси. Межфазную поликонденсацию с образованием тонкого полиамидного слоя проводили при контакте водной фазы (триэтилентетрамин-вода) и органической фазы (изофталойл-хлорид-гексан). Для получения нанокомпозитных мембран фуллеренол $C_{60}(OH)_{22-24}$ диспергировали в водной фазе (0,05—1,5%) при обработке ультразвуком. Краевой угол смачивания определяли методом прикрепленного пузырька (МПП).

В ИТМО НАН Беларуси силу адгезии оценивали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, NT-206, ОДО «Микротестмашины», Беларусь) на основании отрыва острого зонда (NSC 35, жесткостью 3,5 Н/м, радиус кривизны 30 нм) от поверхности мембраны. Краевой угол смачивания оценивали методом «неподвижной капли» (МНК).

Результаты и обсуждение. В результате проведенной работы показано, что введение добавки фуллеренола увеличивает степень гидрофильности селективного слоя капиллярных мембран. Результаты представлены в табл. 1. Следует отметить, что с увеличением концентрации фуллеренола до 0,1 мас.% наблюдается плавное снижение краевого угла смачивания поверхности селективного слоя мембран. При введении же фуллеренола в количестве 0,3% наблюдается более значительное уменьшение краевого угла смачивания.

Таблица 1. Результаты исследования краевого угла смачивания и силы адгезии мембран с различным содержанием фуллеренола

С фуллеренола, мас.%	Угол смачивания (МПП)	Угол смачивания (МНК)	Сила адгезии, нН
0	34±2	56±5%	10,6±10%
0,05	32±2	51±5%	14,6±10%
0,1	30±2	51±5%	13,0±10%
0,3	24±2	50±5%	23,8±10%
0,5	22±2	20±5%	20,8±10%
0,75	21±2	20±5%	32,0±10%
1,0	21±2	10±5%	33,7±10%
1,5	21±2	10±5%	37,5±10%

Выявлено, что при исследовании мембран МПП не зависимо от концентрации фуллеренола наблюдается плавное снижение значений краевого угла смачивания, в то же время при использовании МНК установлено резкое снижение данного параметра для образцов с содержанием фуллеренола 0,5 и 1,0 мас.% в 2,5 и 2 раза соответственно. По результатам определения значений силы адгезии для образцов с концентрацией фуллеренола 0,3 и 0,75% установлено увеличение данного параметра от 10,6 до 23,8 и 32 нН соответственно.

Таким образом, на основании проведенных исследований тремя методами получено, что степень гидрофильности поверхности селективного слоя мембран возрастает с увеличением концентрации фуллеренола. Различия в полученных значениях краевого угла смачивания обусловлены методологией проведения исследований. При помощи МНК характеризуется внешняя селективная пористая поверхность мембраны. С использованием АСМ возможно на нанометровом уровне оценить значения силы адгезии с учетом ее неоднородностей. В случае МПП измерения проводят при условии полной гидратации исследуемой поверхности. Считаем, что для детального анализа гидрофильно-гидрофобного баланса поверхности с учетом структурных неоднородностей целесообразно комплексное применение трех методов исследования, что позволяет получить более полную характеристику физико-химических свойств поверхности мембран.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии», задание Эффективные теплофизические процессы и технологии — 2.6.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

А.С. Михневич, И.В. Мишин

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
selkin_v@mail.ru

Введение. Порошковыми технологиями возможно получать полимерные композиции, которые довольно трудно или вообще невозможно изготовить другими технологическими методами. При этом полимерные материалы можно совмещать как с органическими так и неорганическими наполнителями, получая композиты с заданными свойствами.

Цель — разработка приспособления для создания давления на композит на основе термопластичного полимера и углеродных волокон в процессе плавления предварительно спрессованного материала. При затвердевании расплавленного полимерного композита происходит уменьшение объема композита, что приводит к образованию усадочных дефектов. Для уменьшения этих дефектов в разработанном приспособлении применена пружинная подпрессовка формируемого образца.

Описание приспособления. Внешний вид приспособления показан на рис. 1

Работает приспособление следующим образом. В матрицу 3 насыпают порошкообразный композит, который с помощью пуансона 4 спрессовывают при давлении 40...80 Мпа. Затем прессформу устанавливают между плитами 1 и 5. Путем воздействия пружин 6 на плиту 5, создают давление на образец композита. Приспособление в сжатом состоянии помещают в термостат с необходимой температурой и программой плавления порошковой композиции.

Выводы. Приспособление применимо при изготовлении композитов на основе термопластичных

фторполимеров и углеродных волокон. Образцы композитов получают без усадочных дефектов с отсутствием газовых включений.

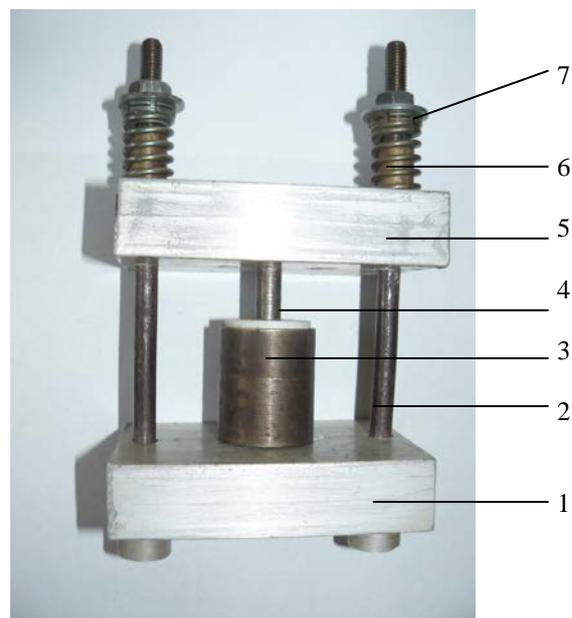


Рис. 1. Приспособление для изготовления лабораторных образцов из порошковых композитов: 1 — неподвижная опорная плита; 2 — стойка; 3 — матрица прессформы; 4 — пуансон прессформы; 5 — подвижная плита; 6 — нажимная пружина; 7 — гайка винтовая

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ

А.А. Охлопкова, Т.А. Охлопкова, Р.В. Борисова, Л.А. Никифоров, А.М. Спиридонов

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация;
okhlopkova@yandex.ru

Среди конструкционных и функциональных материалов особое место занимают наноккомпозиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) благодаря таким уникальным его характеристикам как низкий коэффициент трения, высокие прочность, агрессивности и износостойкость. Особенностью переработки СВМПЭ и композитов на его основе является невозможность перевода полимерной матрицы в вязкотекучее состояние из-за высокого значения молекулярной массы. Вследствие этого возникают сложности при использовании традиционных методов переработки таких как экструзия, литье под давлением и т.д. Другая проблема, вынуждающая к поиску дополнительных технологических приемов, выражается в слабом взаимодействии на границе раздела фаз “полимер-наполнитель”, причиной которого являются различия свойств поверхностей неорганических наночастиц и полиэтилена. Известно, что наночастицы склонны к образованию агломератов, что приводит к снижению их структурообразующей активности и ослаблению межмолекулярного взаимодействия электростатической природы между компонентами системы [1].

Данная задача решена изобретением авторской технологии с применением ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой частоты в жидкой фазе на стадии совмещения полимера и наноразмерных наполнителей (Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , MgO , AlN , Si_3N_4 и др.). Полученные таким способом материалы характеризуются равномерным распределением наполнителя в полимере, что приводит к стабильным и высоким показателям физико-механических и триботехнических показателей (таблица 1).

Таблица 1. Триботехнические и механические свойства СВМПЭ при наполнении керамическими наночастицами

Состав	d, нм	c, мас.%	σ_p , МПа	ϵ_p , %	I, мг/ч
СВМПЭ	—	0	33	315	0,16
СВМПЭ + $\alpha-Al_2O_3$	40	1,0	41	340	0,04
СВМПЭ + SiO_2	7—14	0,1	41	380	0,13
СВМПЭ + ZrO_2	25	1,0	49	380	0,05
СВМПЭ + Si_3N_4	20	0,5	43	390	0,14
СВМПЭ + AlN	35	1,0	42	420	0,06

Примечание: d — средний размер наночастиц, c — концентрация наночастиц, σ_p — предел прочности при растяжении, ϵ_p — относительное удлинение при разрыве, I — скорость массового изнашивания.

На эффективность УЗ диспергирования помимо физических свойств компонентов влияют такие па-

раметры как температура, давление в среде, а также время облучения. Подбором оптимальных режимов и условий УЗ воздействия можно достичь качественного диспергирования наночастиц в среде жидкости с последующим совмещением наночастиц с полимерной матрицей СВМПЭ.

Также было изучено влияние УЗ волн на исходный насцентный порошок СВМПЭ. В ходе испытаний зарегистрировано, что УЗ колебания вызывают довольно существенные изменения морфологии порошка СВМПЭ: если для исходного порошка СВМПЭ характерна фибриллярная, рельефная структура поверхности гранул, то после УЗ обработки поверхность разглаживается, заметно уменьшается количество и глубина пор и пустот, почти отсутствуют ламеллярные нити СВМПЭ. Такой эффект вероятно объясняется локальным поверхностным спеканием, т.к. УЗ колебания приводят к повышению температуры и давления.

Разработанная технология обеспечивает диспергирование агломератов наночастиц в жидкой среде, качественное смешение компонентов порошковой смеси, что гарантирует равномерное распределение наночастиц в полимерной матрице. Преимуществом предлагаемого технологического процесса по сравнению с механохимическим является также исключение возможности загрязнения композита, как это происходит при механохимическом смешении, так что технология может быть применена при разработке материалов медицинского назначения.

Повышение адгезионного взаимодействия неполярной полимерной матрицы СВМПЭ и наноразмерных неорганических соединений также может быть осуществлено с помощью химического модифицирования поверхности порошка СВМПЭ путем бромирования. Данный прием вызывает поверхностную поляризацию, что также положительно сказывается на эксплуатационных свойствах благодаря улучшению межфазного взаимодействия компонентов системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки РФ № 11.1557.2017/ПЧ.

1. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Полисадова В.В., Зыкова А.П. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов: учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета. — 2008, 28—35

ПОЛУЧЕНИЕ ОСНОВЫ РАНЕВОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ НАНОВОЛОКОН ХИТОЗАНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ

Н.Р. Прокопчук, Ж.С. Шашок, Д.В. Прищепенко

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь;bdv91@mail.ru

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется развитию нанотехнологий в медицине. Одним из перспективных направлений области нанотехнологий является технология Nanospider — бескапиллярное электроформование растворов полимеров, отличающееся высокой производительностью и отсутствием проблем, присущим капиллярным установкам. Нановолокна, полученные по данной технологии показывают высокую эффективность в фильтрационных, сорбционных процессах; используются для обеспечения антимикробных и противовирусных барьерных свойств; регулирования водопроницаемости и паропроницаемости; их применяют для создания перевязочных средств при лечении обширных ожоговых поверхностей, незаживающих ран и трофических язв различного происхождения. Установка NS LAB 500 S, имеющаяся на ОАО «Завод горного воска», позволяет получать нановолокна из растворов полимеров по этой технологии, в том числе и из растворов хитозана.

В настоящее время микроорганизмы становятся малочувствительны к антибиотикам из-за массового их применения. В связи с этим необходимы перевязочные средства, не содержащие антибактериальных средств, но обладающих антимикробными свойствами, а также способствующие ускорению заживления ран. Хитозан обладает ранозаживляющим действием, биосовместим, имеет антибактериальные свойства, подвержен биодеградации, проявляет гемостатическую активность. Комбинация антибактериальных свойств и способность к стимуляции репаративных процессов позволяет получать на его основе эффективные раневые покрытия, в том числе и в форме нановолокон [1].

Основное влияние на процесс электроформования оказывают свойства формовочного раствора и технологические параметры его проведения. Оптимальный подбор всех рассмотренных выше свойств формовочного раствора и технологических параметров процесса электроформования является исследовательской задачей в каждом конкретном случае [2].

Цель — подбор технологических параметров электроформования нановолокон из хитозана для получения основы раневого нановолоконного покрытия необходимой плотности и морфологии.

Материалы и методы. Для приготовления формовочного раствора использовали хитозан грибного происхождения марки «Kionutrime-Cs», производства KitoZyme (Бельгия), полиэтиленоксид производства Sigma Aldrich в качестве технологической добавки. Растворитель — 70%-я уксусная кислота.

Концентрация хитозана в растворе составляла 7%.

Структура и равномерность нанесения полученных нановолоконных покрытий исследовалась с применением сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-5610 LV и последующей обработки полученных изображения с помощью программы ImageJ.

Плотность нанесения нановолоконного покрытия контролировалась гравиметрической на образцах размеров 10×10 см.

Результаты и обсуждение. Полученные данные о влиянии технологических параметров на процесс электроформования основы раневого нановолоконного покрытия из хитозана показали, что наиболее приемлемое межэлектродное расстояние между волокнообразующим и собирательным электродами находится в пределах 125—150 мм, при котором средний диаметр волокон составляет 240—280 нм, а плотность нановолоконного покрытия — 0,20—0,37 г/м². С ростом напряжения происходит снижение среднего диаметра нановолокон и увеличение плотности нановолоконного покрытия. Поскольку эксплуатация источника высокого напряжения на максимальной мощности не рекомендуется, то наиболее приемлемым является напряжение 70 кВ, при котором диаметр нановолокон составляет 240—280 нм, а плотность нановолоконного покрытия 0,31—0,37 г/м². Скорость вращения волокнообразующего электрода не оказывает существенного влияния на диаметр получаемого нановолоконного покрытия в диапазоне 4—16 об/мин. Максимальная плотность покрытия 0,31—0,37 г/м² наблюдается при скорости 10 об/мин.

Полученные данные используются на ОАО «Завод горного воска» при освоении производства раневых покрытий из нановолокон хитозана. Разработаны технические условия, по которым была выпущена опытная партия «Покрытия раневые с нановолокнами хитозана “Хитомед-ранозаживляющие” стерильные». Подтверждена медицинская эффективность вышеуказанных раневых покрытий на доклиническом этапе и непосредственно при клинических испытаниях, результатом чего явилось получение регистрационного удостоверения Министерства Здравоохранения РБ.

1. Прокопчук Н.Р., Шашок Ж.С., Прищепенко Д.В. Электроформование нановолокон из растворов хитозана (обзор) // Полимерные материалы и технологии. — 2015 (1), № 2, 36—56
2. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) // Под ред. В.Н. Кириченко. — М.: ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова. — 2001

ОГНЕЗАЩИТНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛИЭФИРНЫХ ВОЛОКОН НЕОРГАНИЧЕСКИМИ АНТИПИРЕНАМИ

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

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, volha107@ Rambler.ru

Введение. Эффективными нетоксичными замедлителями горения для полиэфирных тонкодисперсных материалов являются неорганические соли азота и фосфора; особенно хорошо предотвращают их вторичное тление комплексные нестехиометрические металлофосфаты аммония [1]. Однако при поверхностной обработке полиэфирных волокон с гладкой, химически инертной поверхностью, неорганические антипирены не закрепляются на изделии в достаточных количествах. Нами был разработан метод химической пришивки антипирена к поверхности полиэфирного материала с использованием коллоидных частиц соединений Sn(II) и получением композиционной системы [2, 3]. При этом было найдено, что близкие по химическому и фазовому составу аммонийные фосфаты при одинаковых условиях ступенчатой огнезащитной обработки закрепляются на полиэфирной поверхности в различных количествах.

Цель — исследование влияния химического и гранулометрического состава аммонийно-фосфатных неорганических замедлителей горения на их способность взаимодействовать с активирующим слоем наноразмерных частиц соединений Sn(II) на полимерной поверхности.

Результаты и обсуждение. По результатам электронно-микроскопического исследования выявлено, что неорганические огнезащитные композиции на основе комплексных фосфатов группы CuАН, представляющие собой синтетические продукты, имеют размер частиц твердой фазы не более долей микрона, а в их растворной части присутствуют ионы многовалентных металлов и коллоидные частицы с размерами 25—75 нм. Для огнезащитных композиций группы АН, представляющих собой аммонийные металлофосфаты с размерами твердых частиц в микронном диапазоне (соединения двух- трехвалентных металлов практически отсутствуют), в растворной части коллоидные частицы не обнаружены.

Результаты гравиметрического исследования и огневых испытаний показали, что наивысшей огнезащитной эффективностью по отношению к полиэфирным волокнам обладают композиции, в которых наличествуют коллоидные частицы. Предположительно, эти частицы сорбируются на поверхности наноразмерного активирующего слоя на полимерной поверхности и вступают в химическое взаимодействие с образующимися его соединениями. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии определено относительное массовое содержание ряда эле-

ментов (Al, Sn, Fe, Mg, Ca) как в самих огнезащитных композициях (ЗГ), так и в обработанных ими полиэфирных материалах (ПЭ), табл. В результате проведенных исследований выявлено, что количественный элементный состав антипирена и огнезащитного слоя на полимерной поверхности существенно отличаются, табл. 1.

Таблица 1. Содержание элементов в антипирене (ЗГ) и огнезащитном слое на поверхности полиэфира (ПЭ)

композиция	Содержание элемента, мас.%							
	Al		Fe		Mg		Ca	
	ЗГ	ПЭ	ЗГ	ПЭ	ЗГ	ПЭ	ЗГ	ПЭ
CuАН-1 + ФАТ	8,0	8,5	6,2	22,8	47,4	3,7	31,9	1,6
CuАН-1 + меламина	6,0	12,2	4,8	22,7	44,9	4,0	39,2	2,7

Так, в огнезащитных композициях CuАН-1 с различными аммонийными добавками количество Mg и Ca составляет соответственно (44,9—47,4%) и (31,9—39,2%). На полиэфирном волокне в результате ступенчатой огнезащитной обработки Mg закрепилось (3,7—4%); Ca (1,6—2,7%). По сравнению с составом антипирена, относительное количество Mg уменьшилось в 11—13 раз, Ca — в 15—19 раз. При этом в слое на поверхности полиэфира наблюдается возрастание относительных количеств Fe и Al по сравнению с замедлителем горения. Эти данные подтверждают предположения об особой роли соединений многовалентных металлов в огнезащитных композициях, в том числе в образовании коллоидных частиц.

Таким образом, выявлено, что химическое закрепление на поверхности активированного полимера неорганических соединений азота и фосфора, обладающих огнезамедлительным действием, происходит посредством коллоидных частиц многовалентных металлов, образующихся в синтетических сложносочиненных дисперсиях антипиренов.

1. Богданова В.В., Кобец О.И. Исследование огнезащитной эффективности составов на основе аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов в зависимости от условий получения // Журн. прикл. химии. — 2014 (87), № 10, 1385—1399
2. Рева О.В., Богданова В.В., Шукело З.В. Химическая привязка огнезащитных композиций к полиэфирной матрице // Свиридовские чтения: Сб. статей. — Мн.: БГУ. — 2013, Вып. 9, 158—168
3. Рева О.В., Лукьянов А.С. Определение оптимального метода создания наноструктурированных композиций на основе полиэфирных матриц, обладающих перманентной огнестойкостью // Вестник КИИ МЧС. — 2015, № 2 (22), 35—43

КОМПОЗИТНЫЕ КРИОГЕЛИ СОСТАВА ХИТОЗАН/ПВС И ПВС/ЖЕЛАТИН МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

О.С. Ремез¹, В.В. Паентко¹, В.М. Гунько¹, Ю.В. Матрунчик²

¹Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины, Киев, Украина; remezoleg@ukr.net

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

Введение. Метод криотропного гелеобразования перспективен для совершенствования уже существующих и создания новых материалов для различного практического использования. Эти материалы — криогели имеют уникальное сочетание ряда свойств, например, макропористость основных каналов и микропористость стенок макропор, высокую прочность, биосовместимость, стабильность в биологических средах и экологическую безвредность [1]. Благодаря этому, а также относительной простоте технологии получения, можно рассматривать криогели как новый тип полимерных (и других, например, оксидных) систем, интересных как в научном, так и в прикладном аспекте. В последнее время подобные материалы все шире применяют в области биомедицины и биотехнологии.

Цель работы — получение биоактивных композитных криогелей в условиях высокого и нормального давлений и изучение их строения и свойств.

Материалы и методы. Для их получения использовали поливиниловый спирт, желатин для медицинских целей и хитозан. Получение гидрогелей как прекурсоров криогелей проводили в водной среде.

Высокое давление может быть критичным параметром для получения заданных свойств и характеристик криогелей. Синтез композитных криогелей проводили как под давлением, примерно 1000 атмосфер, в толстостенных стальных криореакторах [2], так и при атмосферном давлении, и исследовали свойства этих материалов. Криореакторы из стали позволяют получить высокое давление в результате образования кристаллов льда, имеющих больший объем, чем жидкая вода. При абсолютно жестких стенках давление льда может составлять около 2000 атм, но с учетом свойств стали оно может достигать около 1050 атм. Высокое давление позволяет сформировать текстуру криогеля, которая может существенно отличаться от текстуры аналогичных материалов, полученных классическим методом криожелирования при стандартном давлении.

Результаты и обсуждение. Гидрогели на основе хитозана и поливинилового спирта получали смешиванием равных объемов водных растворов с концентрацией хитозана 2,5% и 5% поливинилового спирта. В качестве сшивающего реагента использовали глутаровый альдегид. Гидрогели на основе поливинилового спирта и желатина получали смешиванием растворов 2,5—5% желатина и 5% поливинилового спирта. Полученную смесь помещали в криореактор и проводили замораживание при температуре $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 часов. В результате криожелирования со сшивкой полимеров глутаровым альдегидом получали макропористые криогели. Образцы высушивали при комнатной температуре в течение 7 дней.

Влагоотдачу полимерных композитов определяли при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 60%.

Структурно-адсорбционные характеристики полученных композитных криогелей определяли по данным низкотемпературной адсорбции-десорбции азота (что давало информацию в основном о пористости стенок макропор) и методом атомно-силовой микроскопии (для оценки макропористости материалов).

Химическую сшивку полимеров в криогелях исследовали методом ИК-спектроскопии.

На основе полученных данных установлено, что синтезированные криогели имеют развитую макропористую структуру. Макропористость обусловлена образованием кристаллов льда при замораживании, между которыми формируются относительно тонкие стенки материала. Установлено, что высокое давление влияет на структурные характеристики криогелей, в особенности на строение стенок макропор.

1. Gun'ko V.M., Savina I.N., Mikhalovsky S.V. Cryogels: Morphological, Structural and Adsorption Characterisation // Adv. Colloid Interface Sci. — 2013 (187—188), 1—46
2. Allan Mills. The Freezing Bomb // Physics Education. — 2010 (45), no. 2:153 February

ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЕРМОСЛОЕВ ШИННЫХ РЕЗИН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОИСТЫМИ ГЛИНИСТЫМИ СИЛИКАТАМИ

В.Н. Усова¹, П.В. Васильев², Г.П. Валенчиц², Г.Н. Лейзеронок²,
С.П. Богданович¹, С.Н. Каюшников², С.С. Песецкий¹

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
viktoriya.usovav@mail.ru

²ОАО «Белшина», Бобруйск, Беларусь

Введение

Нанокompозиты на основе шинных каучуков и слоистых глинистых силикатов (СГС) являются предметом особого интереса многих научно-исследовательских групп и промышленных компаний [1]. Одной из задач, решаемых при введении СГС в шинные резины, является улучшение барьерных свойств гермослоев и снижение вследствие этого их воздухопроницаемости. Однако эффективность действия глинистых нанонаполнителей в шинных резинах, как и в других полимерах, зависит от степени интеркалирования агрегатов наночастиц в каучуке, предварительной подготовки (органомодифицирования) СГС, технологии компаундирования материала и конечного вулканизата.

Цель работы — анализ влияния отдельных модификаций СГС и их концентрации на воздухопроницаемость гермослоев шин на основе хлорбутилкаучука (ХБК), а также его смеси с натуральным каучуком (НК).

Материалы и методы

Для анализа воздухопроницаемости использовали вулканизованные пластины толщиной 1 мм из резины на базе ХБК и его смеси с НК. В качестве нанонаполнителей при получении резиновых смесей применяли органоглины на основе Na⁺-монтмориллонита: монамет (М), в которой в качестве ПАВ использовали алкильные производные четвертичной соли аммония общей формулы 2НТ2МеN⁺, где НТ — гидрогенизированный таллильный радикал, Ме — метильная группа, и Cloisite (Cl) — глина, обработанная ПАВ типа 2(HE)MeT, где HE — 2-гидроксиэтил. Концентрацию СГС в резиновой смеси варьировали в пределах от 0,5 м.ч. до 7 м.ч. на 100 м.ч. каучука.

Исследования воздухопроницаемости проводили с помощью установки GDP-C ф. Brugger (ФРГ), которая предназначена для тестирования проницаемости газов через полимерные материалы в соответствии с манометрическим методом. Образец для испытаний помещали между верхней и нижней частями проницаемой ячейки. Во время тестирования верхняя часть заполняется воздухом, а объем нижней части минимален и заранее известен. За счет разницы давлений воздух из верхней ячейки диффундирует в нижнюю, а прибор, оценивая увеличение давления в зависимости от времени, позволяет

рассчитать скорость проникновения газа GTR (воздухопроницаемость). С помощью внешнего термостата устанавливается температура образца в диапазоне от –20 °С до 80 °С.

Результаты и обсуждение

Поскольку в процессе эксплуатации шин происходит их саморазогрев, то представлялось важным оценить газопроницаемость при стандартной температуре (Т = 20 °С) и при 70 °С (температура близкая к рабочей температуре гермослоев грузовых шин). Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость воздухопроницаемости от концентрации органоглины в резине и температуры

Состав резины исследуемого образца	GTR, см ³ /м ² ·24 ч·атм	
	T = 20 °С	T = 70 °С
Серийный состав (СС) на основе смеси ХБК+НК	25,3	320
СС + 0,5 м. ч. М	31,5	354
СС + 7 м. ч. М	21,3	329
СС на основе ХБК	17,7	223
СС + 0,5 м. ч. Cl	9,8	150
СС + 7 м. ч. Cl	10,7	178

Из табл. 1 следует, что гермослои, в состав которых входит НК, имеют повышенную газопроницаемость (более высокие значения скорости проникновения газа). Для них при изменении температуры испытаний от 20 °С до 70 °С происходит увеличение воздухопроницаемости в 11,2—15,5 раза.

Для образцов, модифицированных органоглиной Cl, наблюдается значительное снижение GTR по отношению к серийному составу (СС) на основе ХБК. Из табл. 1 видно, что воздухопроницаемость образца СС + 0,5 м.ч. Cl на 44,6% ниже, чем СС, а СС + 7 м.ч. Cl — на 39,6% при T = 20 °С. Состав с добавлением минимального количества СГС (0,5 м.ч.) имеет пониженную воздухопроницаемость на 32,7%, а состав с максимальной концентрацией (7 м.ч.) — на 20,2% при температуре испытаний 70 °С.

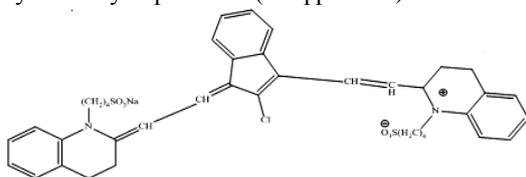
Полученные данные свидетельствуют о возможности значительного снижения воздухопроницаемости гермослоев при введении в состав резины относительно малых добавок специально подготовленных СГС.

1. Rubber-Clay Nanocomposites. Science, Technology, and Applications. Ed. by M. Galimberti. — Wiley. — 2011

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИВИНИЛСПИРТОВЫХ ПЛЕНОК,
СОДЕРЖАЩИХ ДИХРОИЧНЫЕ КРАСИТЕЛИ И ПОИАНИЛИНЛ.Н. Филиппович¹, С.Н. Шахаб¹, А.Н. Еремин², Н.А. Иванова²¹Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь²Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; yan47@mail.ru

Введение. Полианилин (ПАНИ) — один из представителей класса электропроводящих полимеров, обладает свойствами, типичными для полупроводников, а также проявляет окислительно-восстановительную активность и отличается высокой термической и химической стабильностью. Включение ПАНИ в полимерную матрицу может повлиять на оптические и эксплуатационные характеристики пленочного композиционного материала [1].

Цель работы — изучить влияние ПАНИ, стабилизированного поливинилпирролидоном К 90 (ПВП; $M = 360000$) и карбоксиметилцеллюлозой (КМЦ; $M_w = 250000$) на оптические свойства поливинилспиртовых (ПВС) пленок, окрашенных коммерческим красителем *Chicago Sky Blue 6B* (CSB) и новым синтетическим красителем — мононатрий моно(4-(2-(2-(2-хлоро-1-(2-(1-(4-сульфона-тобутил)-3,4-дигидрохинолин-2(1H)-илиден)-эти-лиден)-1H-инден-3-ил)винил)-3,4-дигидрохинолин-1(2H)-ил)бутан-1-сульфонатом (шифр ИК-3)



Материалы и методы. Окислительную полимеризацию ПАНИ проводили в кислой (HCl) водной среде, содержащей 25,1 мМ анилин, 59,1 мМ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ и 18 мг/мл ПВП или КМЦ. В случае КМЦ реакционный раствор также включал 90 мМ додецилсульфат натрия.

Пленки отливали из 9—10%-ного раствора ПВС (150 кДа; Mowiol 28-99, Германия), содержащего (мас.%): глицерин (2,8—3,0), ДМФА (4,0—4,5), H_3BO_3 (0,05—0,10), красители (0,03—0,04), ПАНИ (0,5 мл), этанол (5,0—7,5) и вода (до 100%) [2]. Пленки растягивали в 4%-ном растворе H_3BO_3 при $45,0 \pm 2,0$ °С. После их промывки в дистиллированной воде, сушили 1 ч в термокамере при 60—70 °С. После одноосной ориентации ПВС-пленки имели толщину 50—60 мкм, их степень растяжения составила 3,5—4,0 раза.

Спектры пропускания пленок регистрировали в поляризованном свете на UV-NIR Spectrometer HR4000CG (Ocean Optics, США) с Wire-Grid polarizer UBB01A (Moxtek, США) и определяли поляризующую способность (ПС):

$$\text{ПС} = (T_{\perp} - T_{\parallel}) / (T_{\parallel} + T_{\perp}) \cdot 100\%,$$

где T_{\parallel} , T_{\perp} — пропускание (T) линейно-поляризованного света при параллельном (\parallel) и перпендикулярном (\perp) расположении плоскости колебаний электрического вектора и оси одноосной ориентации пленки [2].

Результаты и обсуждение. Анизотропные ПВС-пленки, окрашенные ИК-3 и CSB, в диапазоне длин волн 594—800 нм характеризуются поляризующей способностью 90—97% (табл.).

Таблица. Спектральные характеристики ПВС-пленок, окрашенных ИК-3 и CSB и содержащих ПАНИ

Образец пленки	С, мас.% / V, мл	λ , нм	ПС, %
ИК-3	0,3	767—800	90—94
ИК-3 / ПАНИ-ПВП	0,3 / 5	763—802	90—97
CSB	0,3	594—690	90—97
CSB / ПАНИ-ПВП	0,3 / 5	658—672	90—91
CSB / ПАНИ-КМЦ	0,4 / 5	586—691	90—99

ПАНИ-ПВП, введенный в ПВС-пленку, содержащую ИК-3, расширяет спектральный диапазон до 763—802 нм, а также повышает ПС до 97% (табл.). По сравнению с ПВС-пленкой, окрашенной лишь одним CSB, ПАНИ-ПВП сужает спектральный диапазон, в то время как ПАНИ-КМЦ значительно расширяет его до 586—691 нм (табл.). Поляризующая способность при этом возрастает от 97 до 99%.

Таким образом, ПАНИ, стерически стабилизированный высокомолекулярными ПВП и КМЦ, можно встраивать в ПВС-пленку, что положительно влияет на ее спектральные характеристики. Так как ПВС-пленка, содержащая кроме ПАНИ-КМЦ и додецилсульфат натрия, отличается высокими спектральными характеристиками, можно заключить, что поверхностно-активное вещество, является уместным компонентом в составе такого рода пленочного композиционного материала.

- Сапурина И.Ю., Стейскал Я. Влияние pH на окислительную полимеризацию анилина, морфологию и свойства продуктов // Успехи химии. — 2010 (79), № 12, 1218—1239
- Алмодарресие Х.А. Поляризационные пленки широкого спектрального диапазона на основе поливинилового спирта, дихроичных красителей и наночастиц. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук. — Минск. — 2014.
- Филиппович Л.Н., Еремин А.Н., Шахаб С.Н., Луговский А.П., Агабеков В.Е. Поливинилспиртовые пленки, содержащие полиметиновый краситель и наночастицы магнетита // Сб. науч. статей «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах». ИТМО НАН Беларуси, Минск. — 2016, 371—377

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ НИЗА ОБУВИ

В.М. Шаповалов¹, В.А. Гольдаде¹, С.В. Зотов¹, К.В. Овчинников¹
А.Н. Буркин², Н.М. Соколова², В.Д. Борозна², А.Н. Радюк²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
zotov-1969@mail.ru

²Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

Введение. Сохраняющаяся зависимость отечественного производства обуви от импортного полимерного сырья выдвигает проблему сохранения и повышения уровня конкурентоспособности. Актуальным является широкое вовлечение в повторный оборот малоценных отходов производства, прежде всего полимерных. В связи с этим выполняются научные исследования по поиску оптимальных путей рециклинга отходов обувного производства для создания материалов, в той или иной степени альтернативных импортным.

Цель работы — оценка возможностей применения накапливаемых отходов обувного производства как перспективного вторсырья для формирования трех востребованных деталей обуви: облегченная подошва, втачная стелька и вкладыш каблука.

Материалы и методы. В экспериментах использовали отходы пенополиуретана и термопластичного полиуретана, отходы термопластичных материалов для подносок, а также гранулированные волокнообразующие полимеры — полипропилен и полиамид. Применяли методы литьевого формования под давлением, экструзии, грануляции, пневмоэкструзии.

Облегченная подошва. На рынке имеются подошвенные материалы плотностью 0,7—1,3 г/см³, твердостью 55—85 условных единиц и стоимостью 2,2—3,0 долл. США за пару подошв. Получение облегченных подошв возможно путем инициирования процесса порообразования в полимерной матрице. В материале из вторичных полиуретанов, претерпевшем значительные реологические и структурные изменения, регулируемое порообразование затруднено. На термопласт-автомате «Main Group» проводили литье пластин и подошв из композиций с содержанием гранулированных вторичных полиуретанов, пластификаторов и нескольких разновидностей порообразователя, варьируя технологические параметры литья (температуры в зонах, скорость заливки, время выдержки). Установлены рецептуры и параметры процесса, позволяющие получить отливки пластин и подошв со сравнительно однородной пористостью, плотностью на 20—25% ниже непористого образца, близкими к требуемым значениями твердости и относительного удлинения. Образцы проходят эксплуатационные испытания.

Втачная стелька. В отечественной обуви ши-

роко используют втачные стельки из многослойного материала фирмы «Biagioli» (Италия). Изделие должно обладать свойствами:

- разрывная нагрузка не менее 600 Н;
- удлинение при разрыве не более 20—25%;
- поверхностная плотность не менее 350 г/м².

Материал толщиной 1,5—2,5 мм должен быть малотягучим при малых деформациях, эффективно прошиваться нитью, выдерживать термофиксацию в растянутом состоянии (110—150 °С, 3—5 мин), не пропускать приливаемую к нему полиуретановую композицию (100 °С, 4—6 мин, 0,5 МПа).

Для замены импортного аналога предложено несколько вариантов волокнисто-пористых материалов в виде полотен из полипропилена, полиамида или их сочетания, выполненных пневмоэкструзионным методом (melt blowing). Установлено, что несмотря на перспективность melt-blown материалов, волокна которых когезионно скреплены в местах контакта и текстуру которых можно варьировать в широких пределах, по основным показателям качества они уступают высокотехнологичным многослойным материалам «Biagioli». Основные недостатки — низкая прочность, излишняя тягучесть, просекание ниткой, проникание литьевой композиции. Продолжается доработка melt-blown материалов с целью их упрочнения (в том числе за счет сочетания с другими волокнистыми структурами) и повышения технологичности.

Вкладыш каблука. Деталь должна обладать низкой плотностью и достаточно высокой прочностью. Целесообразно изготавливать вкладыш каблука путем щелевой экструзии смеси отходов термопластичных материалов для подносок, отходов стелечного картона и связующих с высокой текучестью, что обеспечит взаимную адгезию компонентов

Заключение. Неизбежные и вполне ожидаемые технологические и технико-экономические затруднения, связанные с поиском альтернативных импортным дешевых материалов для деталей обуви, могут быть преодолены совместными усилиями ученых и технологов. Это осуществимо путем совершенствования методических подходов и обеспечения должной кооперации при планировании исследований.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ С ПОВЫШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.М. Шаповалов¹, В.В. Тимошенко¹, К.С. Носов¹, О.Е. Пантюхов²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Введение. Создание полимерных композиционных материалов широкого функционального назначения из вторичных полимеров, в том числе, отходов корпусов электронной и электрической техники, относится к области разработки ресурсосберегающих технологий. Одним из направлений при решении данной проблемы является разработка технологических принципов целевого рециклинга полимерных отходов (полиолефины, ПВХ, АБС-сополимер, полистирол, ПЭТФ и др.) путем получения на их основе измельчением, агломерированием и гранулированием композиционных материалов с модифицирующими добавками для формирования изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Цель — разработка составов композиционных материалов на основе полимерных отходов корпусов электронной и электрической техники различного назначения с повышенным комплексом физико-механических характеристик

Материалы и методы. Формование образцов для испытаний проводили на термопластавтомате ТП EN 30. Подача композита в литьевую машину осуществляется вручную через загрузочный бункер. Режимы переработки 190—200 °С. Показатели разрушающего напряжения и относительного удлинения при растяжении определяли по ГОСТ 11262-80 с помощью автоматизированного стенда INSTRON 5567. Скорость раздвижения зажимов выбирается, чтобы время от момента приложения нагрузки к образцу до его разрушения составляло не менее 1 мин. Ударную вязкость по Шарпи определяли по ГОСТ 4647-80.

Результаты и обсуждение. По результатам исследований были разработаны составы композиционного материала на основе полимерных отходов корпусов электронной и электрической техники и различных наполнителей. Анализ составов показывает, что использование в качестве наполнителя ПЭНП, ПЭВП, СЭВ в композитах негативно сказываются на комплексе физико механических характеристик, так разрушающее напряжение при растяжении падает на 20...50%, относительное удлинение на 10...20%, ударная вязкость на 5...45%. Это связано с высоким различием показателя текучести расплава компонентов смеси, так если АБС имеет показатель текучести расплава в пределах 20 г/10мин, то ПЭНП, ПЭВП, СЭВ в интервале

4...5 г/10 мин в результате чего в процессе переработки не происходит равномерного перемешивания компонентов смеси и полимеры ПЭНП, ПЭВП, СЭВ, выступая в матрице в виде наполнителя, располагаются в виде локальных дефектных участков служащими концентраторами напряжений в конечной композиции, причем количество таких зон возрастает с увеличением процентного содержания компонента. Использование в качестве наполнителя полимеров ПУ, ПС, ПП оказывает положительное воздействие на комплекс физико-механических характеристик конечной композиции, так при использовании ПУ наблюдается некоторое снижение разрушающего напряжения при растяжении на 5...15%, при неизменном относительном удлинении, но при этом возрастает на 20% ударная вязкость, что связано с высокими показателями вязко-упругих свойств ПУ. Полученный материал может успешно использоваться при производстве длинномерных изделий, например труб, где ударная вязкость является важным показателем. При использовании в качестве наполнителя ПС либо ПП наблюдается возрастание разрушающего напряжения при растяжении на 10...20% при незначительном снижении относительного удлинения на 5...10%. Повышение прочности композиций с использованием ПС либо ПП обусловлено, по видимому, тем что макромолекула ПП либо ПС имеет линейную структуру и в процессе переработки выступает в роли армирующего элемента системы. Такого рода композиты можно использовать при производстве различной тары, например для продукции растениеводства. При использовании АБС в качестве наполнителя в полимер-минеральных системах, наблюдается возрастание прочности композиции на 10...15%, что обусловлено армированием структуры композита частицами АБС. Такого рода композиты можно использовать при производстве тротуарной плитки, канализационных люков, ливневых решеток и др. высоконаполненных полимер минеральных изделий.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают эффективность модифицирования полимерных отходов корпусов электронной и электрической техники для получения композиционных материалов различного назначения с повышенным комплексом физико-механических характеристик.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТР-ЭЛЕМЕНТОВ

В.Ю. Шумская, Л.А. Калинин

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
viktoriya-shumsk@mail.ru

Введение. Практически в любом современном производстве и технологическом процессе присутствуют системы фильтрации, очистки и подготовки сырья и технологических продуктов. В этой связи актуальной и важной научно-прикладной задачей является создание новых пористых полимерных материалов для эффективной очистки многофазных сред (нефтепродукты, бензин — вода и механические примеси; воздух — туман масла, воды или кислоты и механические примеси и т.д.) и оборудования для их производства.

Цель. Изучение фильтрующих свойств полимерных волокнисто-пористых материалов (ВПМ) различных типов, отличающихся пористостью, морфологией, структурой и сравнение фильтрующей способности фильтр-элементов (ФЭ) различной конструкции.

Материалы. Иглопробивной материал «Филарс» из арселона, «Синтепон» — полотно объемное, термоскрепленное (ОАО «СветлогорскХимволокно»), «Синтепон» пропитанный 10% спиртовым раствором поливинилбутирала, «Грифтекс» — волокнисто-пористый политетрафторэтилен (ИММС НАН Беларуси), волокнисто-пористый полипропилен, изготовленный по технологии пневмо экструзии (СКТБ «Металлополимер» и НТЦ «Ларга»). Использовались масла: вакуумное марки VM-4, индустриальное масло — И-20, турбинное — ТП-22.

Методики. При изучении движения масла вдоль ВПМ образец пропитывался в емкости с маслом. Заполненный маслом образец подвешивался на установленный на весах штатив и фиксировалась скорость убыли массы образца «рис. 1, а». Скорость протекания масла, поперек ВПМ изучалась на ячейке в виде цилиндра с перфорированной нижней частью, вокруг которой был, обернут слой ВПМ. Масло наливалось в ячейку до постоянного уровня, а вытекающее масло собиралось в установленный на весах стакан «рис. 1, б».

Гидрофобные свойства ВПМ определялись по высоте водяного, удерживаемого им «рис. 1, в».

Для оценки способности ФЭ к самоочистке были изготовлены два макета фильтр-элементов. Первый ФЭ представлял собой 5 последовательно скрепленных между собой образцов, разделенных имитацией концевых элементов, общей длиной 1 м и второй цельный длиной 1 м. ФЭ изготовлены из пористого полипропилена. Эксперимент проводился по методике изучения движения масла вдоль ВПМ.

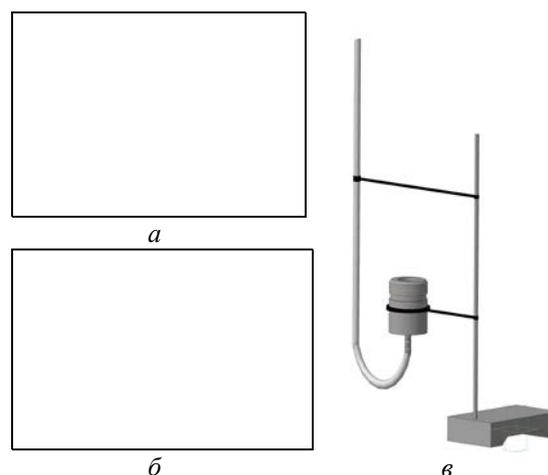


Рис. 1. Схемы испытательных стенов: а — движение масла вдоль ВПМ; б — движение масла поперек ВПМ; в — изучение гидрофобных свойств ВПМ

Результаты. Установлено, что скорость вытекания масла из слоя носит экспоненциальный характер и зависит от поровой структуры материала и её устойчивости. Наиболее легко отдают масло материалы с жесткой структурой типа термоскрепленного полипропилена из относительно толстых волокон. Характерно, что по мере вытекания масла во всех образцах остается «масляная ванна», в которой практически все поры заполнены маслом, а ее высота зависит от поровой структуры. Мягкие материалы при пропитывании маслом значительно сжимаются, что приводит к существенному снижению пористости. Нанесение ВПМ «Грифтекс» позволяет в широких пределах варьировать гидрофобные свойства материала, добиваясь высоких водоупорных свойств. Определено, что скорость стекания масла в целом ФЭ 1,5 быстрее и суммарная масляная ванна в 5 раз меньше, чем у ФЭ разделенного концевыми элементами, что улучшает эксплуатационные характеристики.

Таким образом, для эффективного функционирования ФЭ должен быть изготовлен из максимально жесткого ВПМ состоящего из скрепленных между собой волокон. Нанесение разных толщин ВПМ «Грифтекс», позволяет варьировать свойства гидрофобности фильтрующего материала. Наиболее выгодной конструкцией с точки зрения эксплуатации является цельный ФЭ.

ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПВХ

М.А. Ярмоленко

Международная Китайско-Белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; simmak79@mail.ru

Внутрибольничная инфекция является причиной серьезных послеоперационных осложнений, которые могут приводить к гибели пациента [1 — 5]. Наиболее остро данная проблема стоит в области протезирования, когда в организм человека внедряют имплантаты различного назначения. При этом потребность в имплантатах с каждым годом возрастает, что обусловлено ростом средней продолжительности жизни населения планеты. Качество жизни пациентов напрямую зависит от эффективности решения проблемы поверхностного инфицирования внутрибольничными инфекциями имплантатов.

Полимерные тонкослойные системы, содержащие в своей структуре антибактериальный компонент, способны к самоочищению (на основе водорастворимых или биоразлагаемых полимеров), пролонгированному высвобождению лекарственного компонента. Недостатком полимерных тонкопленочных систем является невысокое адгезионное взаимодействие с металлическими поверхностями, низкое сопротивление истиранию. Это может приводить к быстрому удалению покрытия в процессе введения имплантата в организм.

Углеродные покрытия (DLC) характеризуются высокой износостойкостью и биосовместимостью [6—9]. Нанесение промежуточных подслоев позволяет осаждать углеродные покрытия с высокой адгезией к металлическим поверхностям. Одним из основных недостатков использования антибактериальных углеродных слоев является то, что в качестве антибактериального компонента всегда выступают металлические частицы: серебро, медь, цинк и др [6 — 9]. Перечисленные металлы являются потенциально токсичными для клеточных культур [1, 3, 5]. В ряде случаев углеродные металлсодержащие покрытия не эффективны для борьбы с инфекцией в области имплантата [7]. Антибактериальная активность покрытий проявляется только при непосредственном контакте патогенного микроорганизма с тонким слоем. Углеродные покрытия не могут быть использованы в качестве слоев с программируемым высвобождением лекарственного компонента.

Цель работы — рассмотрение особенностей молекулярной структуры и свойств тонкослойных систем на основе продуктов электронно-лучевого диспергирования поливинилхлорида (ПВХ).

В качестве материала мишени предложено использовать сконденсированные продукты электронно-лучевого воздействия в вакууме на поливинилхлорид (ПВХ). Рассмотрена молекулярная структура подобных покрытий.

Согласно проведенным исследованиям сформированные покрытия представляют собой полисопряженные структуры. Низкотемпературная обработка снижает долю sp гибридных атомов углерода и повышает долю атомов углерода в sp^2 гибридном состоянии. Термически инициируемые реакции взаимодействия двойных связей друг с другом сопровождаются образованием графитовых структур, а также протяженных полиеновых фрагментов с длиной, достигающей 8 единиц.

Композиционные покрытия на основе продуктов электронно-лучевого диспергирования ПВХ характеризуются повышенной стойкостью к истиранию в сравнении с композиционными слоями на основе полиуретана (ПУ).

1. Romand C.L. Antibacterial Coating of Implants in Orthopaedics and Trauma: a Classification Proposal in an Evolving Panorama // *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. — 2015 (10), 157
2. Cloutier M., Mantovani D., and Rosei F. Antibacterial Coatings: Challenges, Perspectives, and Opportunities // *Trends in Biotechnology*. — 2015 (33), 637—652
3. Nie C. Bioinspired and Biocompatible Carbon Nanotube-Ag Nanohybrid Coatings for Robust Antibacterial Applications // *Acta Biomaterialia*. — 2017 (17), 27—32
4. Cloutier M. On the Long Term Antibacterial Features of Silver-doped Diamondlike Carbon Coatings Deposited via a Hybrid Plasma Process // *Biointerphases*. — 2014 (9), 35—42
5. Grischke J., Eberhard J., and Stiesch M. Antimicrobial Dental Implant Functionalization Strategies — A Systematic Review // *Dental Materials Journal*. — 2016 (35), 545—558
6. Penkov O.V. Highly Wear-Resistant and Biocompatible Carbon Nanocomposite Coatings for Dental Implants // *Biomaterials*. — 2016 (102), 130—136
7. Cardoso M. Abutment Coating With Diamond-Like Carbon Films to Reduce Implant-Abutment Bacterial Leakage // *J Periodontol*. — 2016 (87), 168—174
8. Liao T.T. Biological Responses of Diamond-Like Carbon (DLC) Films with Different Structures in Biomedical Application // *Materials Science and Engineering C*. — 2016 (69), 751—759
9. Cloutier M., Turgeon S., Busby Y., Tatoulian M., Pireaux J.J., and Mantovani D. Controlled Distribution and Clustering of Silver in Ag-DLC Nanocomposite Coatings Using a Hybrid Plasma Approach // *ACS Appl Mater Interfaces*. — 2016 (8), 21020—21027

ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ДИОКСИРАНОВ

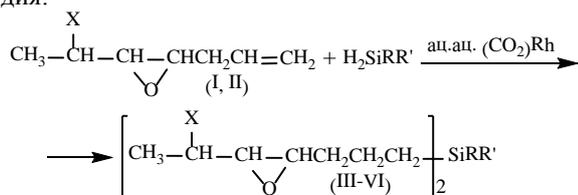
О.В. Аскеров, В.А. Джафаров, А.Ф. Гулиева, Г.Д. Ханбабаева

Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; ipoma@science.az

Введение. Применение термостойких материалов ставит перед исследователями задачу нахождения метода получения элементоорганических (Si, Ge, Sn, Pb) мономеров для создания на их основе полимерных материалов, способных сохранять долгое время эксплуатационные свойства [1—3].

Цель — разработать способ получения кремнийорганических диоксиранов, на основе которых можно получить композиционный материал, отличающийся высокой тепло- и термостойкостью.

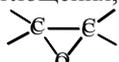
Материалы и методы. Их синтез осуществлен путем присоединения алкиларилдигидридсиланов к непредельным оксиранам в присутствии катализатора — ацетилацетоната дикарбонила родия:



X=Cl, R=R'=C₆H₅ (III); R=C₂H₅, R'=C₆H₅ (IV);

X=Br, R=C₂H₅, R'=C₆H₅ (V); R=R'=C₆H₅ (VI)

Строение полученных аддуктов подтверждены данными современных методов анализа. В ИК-спектрах обнаружены полосы поглощения, характерные для Si—C_{алк.} (1250 см⁻¹),



(895, 914, 3055 см⁻¹), C—Cl (737 см⁻¹), C—Br (650 см⁻¹)

Экспериментальная часть

В ампулу, воздух из которой вытеснен, помещают 22,12 г (0,12 моль) дифенилдигидридсилана, 35,4 г (0,24 моль) свежеперегнанного 2-хлор-оксираногепт-6-ена и 0,01 г ацетилацетоната дикарбонила родия. Ампулу запаивают в токе азота и помещают в масляный термостат, где поддерживают температуру 110—115 °С в течение 20 часов. Затем ампулу вскрывают, образовавшуюся массу растворяют в бензоле и отфильтровывают от механических примесей. После отгонки растворителя остаток подвергают вакуумной перегонке при температуре 120 °С (остаточное давление 0,5 мм рт.ст.). При этом легкокипящие компоненты не отгонялись. Полученный диоксираносилан (III) представляет собой прозрачную вязкую массу светло-желтого цвета. Выход количественный. Найдено, %: С 70,21; Н 7,12; Si 6,50; Cl 8,02. C₂₆H₃₂O₂Cl₂Si. Вычислено, %: С 70,92; Н 7,34; Si 6,38; Cl 8,06.

Аналогично получены соединения (IV-VI) с молекулярной массой 480 (IV), 590 (V), 560 (VI, криоскопически в бензоле).

Результаты и обсуждение

Полученные галогенсодержащие диоксираны (III-VI) были использованы в качестве модификатора для получения эпоксидиановой смолы ЭД-20 (10, 20, 30 мас.ч. на 100 мас.ч. эпоксидиановой смолы). Процесс отверждения проводили при 90 ± 5 °С в течение 5 часов и дополнительно в течение 5 часов при температуре 125 ± 5 °С в присутствии перекиси бензоила и диметиланилина. Показано, что введение указанных соединений в качестве модификаторов в состав ЭД-20, отверждаемой малеиновым ангидридом, приводит к значительному увеличению термостойкости, относительного удлинения и огнестойкости отверждаемой композиции. Из данных модификаторов следует, что наиболее эффективными модификаторами является галогенсодержащий диоксиран (IV) применяемый в количестве 20 мас.ч., применение которого приводит к значительному возрастанию относительного удлинения, термостойкости, огнестойкости и предела прочности отвержденной композиции по сравнению с немодифицированной смолой.

Показано, что присоединение дифенилдигидридсилана к непредельным оксиранам этиленового ряда протекает по этиленовой С=C связи в присутствии катализатора (ацетилацетонат дикарбонила родия, платинохлористоводородная кислота). При этом оксирановое кольцо остается незатронутым. Выход целевых аддуктов в случае (ацетилацетоната дикарбонила родия выше, чем при использовании платиновых катализаторов.

Установлено, что среди испытанных соединений наиболее эффективными модификаторами являются хлор, бромсодержащие диоксираны, которые могут быть использованы в качестве антипиренов-модификаторов эпоксидиановой смолы.

1. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. — М.: Химия. — 1975
2. Моцарев Г.В., Соболевский М.В., Розенберг В.Р. Карбофункциональные органосиланы и органосилоксаны. — М.: Химия. — 1990
3. Аскеров О.В., Джафаров В.А., Гулиева А.Ф. Синтез ацетат- и кремнийсодержащих оксиранов / Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 1150-летию персидско-таджикского ученого-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибн Закария Рази. — Душанбе. — 2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

В.П. Бирюков, А.А. Фишков

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; laser-52@yandex.ru

Цель работы. Определение оптимальных геометрических параметров наплавленных слоев с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ).

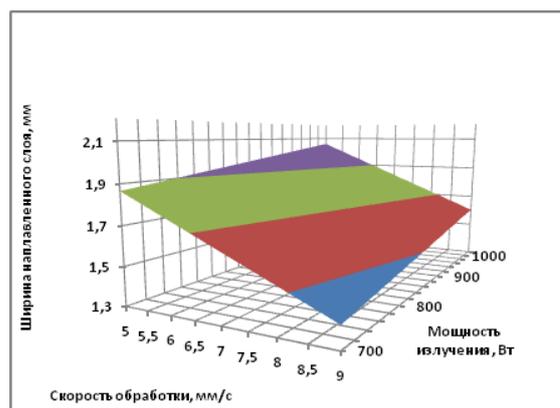
Материалы и методы. В экспериментах использовалась лазерная установка «Комета-М»[1]. Для наплавки выбран порошок на основе железа ФБХ6-2. Образцы изготавливали из стали 20 с размерами 15×20×80 мм. Перед наплавкой образцы обезжировали ацетоном и просушивали в печи при температуре 75 °С в течение 30 минут. Присадочный порошковый материал наносился на образцы в виде обмазки. В качестве связующего вещества использовали водный раствор оксигидроксицеллюлозы. Толщина слоя составила 0,9 мм. В качестве факторов при математическом планировании экспериментов были выбраны мощность излучения — P (700—1000 Вт), скорость обработки — V (5—9 мм/с), и диаметр пучка — d (2—3 мм). Отклики эксперимента: высота валика H , мм, ширина B , мм и глубина зоны термического влияния (ЗТВ) Z , мм. В качестве дополнительного дискретного фактора рассматривалось сканирование луча с частотой $f = 220$ Гц. Измерения геометрии наплавленных валиков выполнялось на микроскопе Альтами МЕТ 1С.

Результаты и обсуждение. Согласно методике ПФЭ получены коэффициенты уравнений регрессии для всех откликов. Выполнены тождественные преобразования от кодированных переменных к натуральным величинам и получены результирующие математические модели вида:

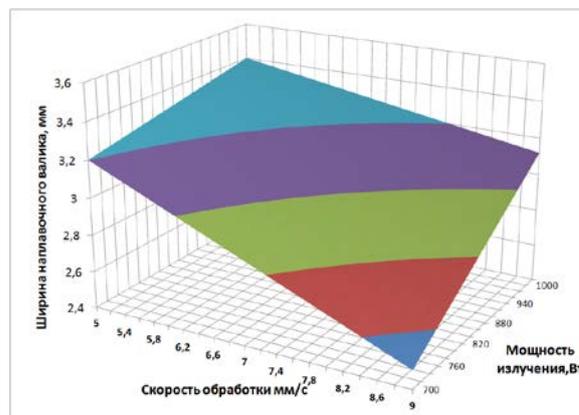
$$H, B, Z = f(P, V, d). \quad (1)$$

Анализ полученных уравнений показывает прямо пропорциональную зависимость между мощностью излучения и высотой валика и обратно пропорциональную зависимость между скоростью и высотой наплавленного слоя. Ширина валика возрастает с увеличением мощности и диаметра луча, и уменьшается при увеличении скорости обработки. Сканирование приводит к росту ширины с одновременным уменьшением высоты валика и повышает производительность наплавки в 1,3—1,9 раза. Анализ уравнений для глубины ЗТВ показывает, что наибольшее влияние на глубину ЗТВ оказывает мощность излучения. Увеличение скорости приводит к уменьшению глубины ЗТВ, что объясняется меньшей мгновенной энергией, поглощенной наплавленным материалом в единицу времени. Построены сравнительные поверхности, для ширины

зон наплавки B и $B_{\text{скан}} = f(P, V)$ при $d = 2$ мм, рис. 1, *a* и *б* соответственно. Микротвердость наплавленных слоев находится в пределах 7600—8200 МПа.



а



б

Рис. 1. Зависимость ширины валика от мощности излучения и скорости обработки: а — наплавка расфокусированным лучом; б — наплавка сканирующим лучом

Расчетные данные параметров наплавленных слоев сопоставлены с экспериментальными данными их максимальные расхождения не превышают 4%.

1. Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала / Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2006, № 1, 60—66
2. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. — М: Наука. — 1980

РАЗРАБОТКА АКРИЛОВОГО ФОРПОЛИМЕРА ДЛЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

Г.В. Бутовская¹, И.А. Климовцова¹, Е.В. Гринюк^{1,2}, Л.П. Круль^{1,2}

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; galina_butovskaya@mail.ru

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. В последние годы значительный интерес вызывают пластики холодного нанесения («холодные пластики»), которые являются альтернативой современным лакокрасочным материалам и термопластикам, используемым для получения горизонтальной дорожной разметки.

Холодными пластиками в соответствии с СТБ РБ 1520-2008 [1] называют разметочные материалы на основе реакционноспособных мономеров, содержащие пигменты и наполнители и образующие после химического отверждения твердые непрозрачные покрытия с высокой функциональной долговечностью. Полимерной основой большинства холодных пластиков являются метакриловые смолы, содержащие добавку мономеров в качестве растворителя [2, 3].

Наиболее распространенными полимерными связующими, используемыми для производства холодных пластиков, являются продукты под торговыми марками DEGAROUTE[®]661 (Германия) и ИНДПОЛ ХП (Россия). Однако для данных смол неизвестно ни соотношение мономеров в исходной смеси, ни конкретная природа ускорителя полимеризации, ни технологические особенности синтеза целевого продукта.

Цель работы — разработка акрилового форполимера для полимерного композита холодного пластика, близкого к промышленному аналогу по составу и физико-химическим свойствам.

Материалы и методы. Для установления качественного и количественного состава исходных смол—аналогов марки DEGAROUTE[®]661 и ИНДПОЛ ХП, предполагающего определение состава как полимерной, так и не полимерной части смолы, в том числе количественный анализ содержания различных мономерных звеньев в цепях исходных смол, использовался метод ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. ИК спектры записывали на спектрометре BRUKER ALPHA в режиме нарушенного полного внутреннего отражения с использованием приставки ATR Platinum.

Результаты и обсуждение. Установлен состав промышленных образцов акриловых смол DEGAROUTE[®]661 и ИНДПОЛ ХП. Показано, что полимерной основой указанных смол являются сополимеры метилметакрилата с н-бутилакрилатом с содержанием звеньев н-бутилакрилата, равным 15—20 мол.%. В качестве растворителя сополимера используется метилметакрилат, массовая доля которого в промышленных акриловых смолах близка к 0,5.

В лабораторных условиях отработана методика блочной сополимеризации метилметакрилата с н-бутилакрилатом в присутствии пероксида бензоила при варьировании соотношения мономеров, концентрации пероксида бензоила, температуры.

С целью получения сополимера заданного состава проведены экспериментальные исследования по сополимеризации метилметакрилата с н-бутилакрилатом в присутствии пероксида бензоила с использованием приема компенсационной сополимеризации, предполагающего дозированное введение одного из мономеров в ходе реакции в различных условиях. Показано, что теоретически рассчитанное соотношение мономеров 0,91:0,09 в соответствии с уравнением Майера—Лоури [4] не позволяет получать сополимер с содержанием звеньев бутилакрилата 20%. Кроме того, при таком соотношении мономеров сложнее контролировать процесс сополимеризации, что может привести к резкому возрастанию вязкости реакционной смеси и затруднению равномерности теплоотвода из ее объема.

С целью лучшего контроля процесса сополимеризации, а также для получения сополимера, близкого по составу к промышленным аналогам, предложено компенсационное количество н-бутилакрилата увеличить в два раза и вводить его в определенном температурном интервале сополимеризации,

Предложено введение метилметакрилата в качестве растворителя получаемого сополимера на начальной стадии охлаждения реакционной смеси. При этом с целью равномерного теплоотвода из всего объема реакционной смеси необходимо осуществлять ее перемешивание как в течение всего процесса сополимеризации, так и в процессе ее охлаждения для предотвращения возможной гомополимеризации добавляемого метилметакрилата.

Таким образом, в ходе лабораторных исследований отработаны режимы получения акрилового полимерного связующего холодного пластика для дорожной разметки.

1. СТБ 1520—2008. Материалы для горизонтальной разметки автомобильных дорог. — Мн.: Госстандарт. — 2008
2. Брок Т., Гротеклаус М., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям — М.: Пэйнт-Медиа. — 2004
3. Баженов Ю. М. Бетонополимеры — М.: Стройиздат. — 1983
4. Дерябина Г. И. Сополимеризация: учебное пособие. — Самара: Изд-во «Самарский университет». — 2013

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОК НА МОЛЕКУЛЯРНУЮ И ФАЗОВУЮ СТРУКТУРУ ПОЛИ-*L*-ЛАКТИДА С ДОБАВКАМИ СТЕАРАТА ПОЛИГЕКСАМЕТИЛЕНГУАНИДИНА

Г.В. Бутовская^{1,3}, В.А. Тарасевич², В.А. Добыш², А.А. Федоренко³

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; galina_butovskaya@mail.ru

²Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Биоразлагаемые полимеры, в том числе полилактиды, находят в настоящее время самое широкое применение: от медицины до пищевой промышленности [1]. Однако в повседневной жизни существуют риски заражения пищевых продуктов и воды микроорганизмами, а также внесения бактериальных инфекций в организм человека при использовании полимерсодержащих медицинских изделий. Хорошо известными антимикробными средствами против грамположительных и грамотрицательных бактерий, грибов и вирусов являются соли полигуанидина [2]. Создание композитов на основе полилактидов с добавками стеарата полигексаметиленгуанидина (ПГМГ), обладающих наряду с антибактериальными свойствами способностью к биоразложению, представляется весьма актуальным.

Цель работы — выяснение влияния стеарата ПГМГ на молекулярную и фазовую структуру пленок поли-*L*-лактида (П-*L*-Л).

Материалы и методы. Исследовали промышленный П-*L*-Л марки 4043D производства фирмы «Nature Works LLC» (США). Содержание *D*-изомера составляло 4,6%, а средневязкостная молекулярная масса (M_v) — $1,7 \cdot 10^5$ Да. Стеарат ПГМГ синтезировали по методике [4]. Порошок П-*L*-Л получали криогенным диспергированием гранул.

Пленки исходного П-*L*-Л и П-*L*-Л с добавками стеарата ПГМГ формировали из раствора в трихлорметане, а также получали методом экструзии, толщина пленок 150 и 40—60 мкм соответственно. Содержание стеарата ПГМГ в пленках, полученных из раствора, составляло 0—12%, а в экструдированных пленках 0—5%. В результате экструзии M_v П-*L*-Л снизилась на 30%.

ИК-спектры пленок записывали на Фурье-ИК спектрометре ALPHA (BRUKER Optik GmbH) с приставкой НПВО ATR Di через 2 см^{-1} в диапазоне $4000—400 \text{ см}^{-1}$, 24 скана. Положение полос поглощения определяли по вторым и четвертым производным спектра. Разложение сложного контура перекрывающихся полос проводили, используя программу Peak Separation «Netzsch—TA4».

Результаты и обсуждение. Установлено, что пленки, сформированные из раствора, имеют степень кристалличности 55%, которая линейно увеличивается с ростом концентрации добавки, в то время как пленки, полученные экструзией, являются прак-

тически аморфными.

Методом Фурье-ИК спектроскопии доказано, что в исследуемых пленках присутствует вода (пик 1635 см^{-1}). Показано, что изменение структуры П-*L*-Л коррелирует с присутствием свободной жидкой воды, влияющей на межмолекулярные взаимодействия в полимере.

Содержание добавок стеарата ПГМГ в поверхностных слоях верхней и нижней частей пленок, сформированных обоими способами, пропорционально их содержанию в смеси, что свидетельствует о равномерности распределения добавки в полимер-матрице (рис. 1).

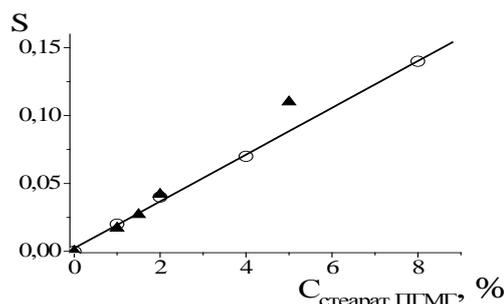


Рис. 1. Зависимость нормированной на репер площади полосы 2850 см^{-1} Фурье-ИК спектра пленок П-*L*-Л от содержания стеарата ПГМГ (▲ — пленки получены экструзией; ○ — из раствора)

Обсуждается возможность участия концевых аминных и гуанидиновых групп стеарата ПГМГ во взаимодействии со сложноэфирными звеньями П-*L*-Л, протекающем при высокой температуре в экструдере и приводящем к ковалентной иммобилизации стеарата ПГМГ.

1. Auras R., Harte B., and Selke S. An Overview of Poly(lactides) as Packaging Materials // *Macromol. Biosci.* — 2004 (4), no. 9, 835—864
2. Воинцева И. И., Гембицкий П. А. Полигуанидины — дезинфекционные средства и полифункциональные добавки в композиционные материалы. — М.: ЛКМ — пресс. — 2009
3. Wang H., Langner M., and Agarwal S. Biodegradable Aliphatic-aromatic Polyester with Antibacterial Property // *Polym. Eng. Sci.* — 2016 (56), no. 10, 1146—1152
4. Способ получения солей полигексаметиленгуанидина. Патент РБ № 12656, опублик. 08.09.2009. Тарасевич В.А., Агабеков В.Е., Лысенков В.И., Карпинчик Е.В., Макаутун В.Н., Юрочка В.В.

СИНТЕЗ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ 2-ЗАМЕЩЕННЫХ ЦИКЛОПРОПИЛСТИРОЛОВ

К.Г. Гулиев¹, Ц.Д. Гулвердашвили², А.И. Садыгова², А.М. Алиева¹, Д.Б. Тагиев²

¹Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; ipoma@science.az

²Азербайджанский Медицинский Университет, кафедра биофизической и биоорганической химии, Азербайджан

Введение. В последние годы соединения, содержащие в структуре трехчленный углеродный цикл, привлекают большое внимание исследователей своими специфическими свойствами, такими как бактерицидная активность, фоточувствительность, оптическая прозрачность и т.д.

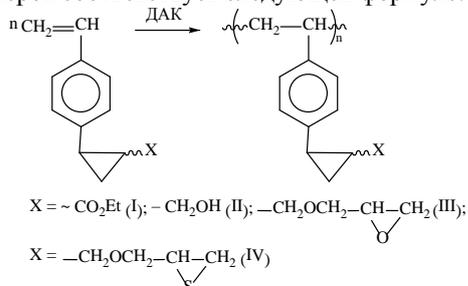
Цель работы — синтез новых п-(2-функциональнозамещенных)циклопропилстиролов, исследование полимеризации как в растворе, так и в массе в присутствии динитрилазоизомасляной кислоты и изучение литографических и некоторых других свойств.

Материалы и методы. Конденсацией этилдиазоацетата с п-дивинилбензолом в присутствии каталитического безводного CuSO_4 был синтезирован в начале п-(2-этоксикарбонил)циклопропилстирол (I), который затем путем восстановления с LiAlH_4 был превращен в соответствующее соединение (II). Мономеры (III) синтезировали взаимодействием соединения (II) с эпихлоргидрином.

Тиоглицидилный эфир был синтезирован взаимодействием соединения III с тиокарбамидом. Выход составил 53—96%.

Результаты и обсуждение. Полимеризацию синтезированного мономера проводили в ампулах в массе и в растворе в присутствии 0,3% динитрилазоизомасляной кислоты (ДАК) от суммарной массы мономера при 70 °С.

Изучение структуры полученных полимеров на основе данных ИК- и ПМР-спектроскопии показало, что в выбранных условиях полимеризация протекает только по винильной группе, а циклопропан с заместителями остаются незатронутыми в боковых цепях макромолекулы. Структура макроцепи полученных полимеров соответствует следующей формуле:



Показано, что введение любой функциональной группы в пара-положение стирола значительно ускоряет реакцию полимеризации, причем при наличии электроакцепторной группы, в результате большего сопряжения и поляризации винильной группы, реакционная способность мономеров возрастает сравнительно в большей степени.

Установлено, что скорость полимеризации синтезированных мономеров в зависимости от природы уменьшается в следующем ряду: I > II > III > IV. Полученные полимеры растворимы во многих органических растворителях, причем растворимость полимеров зависит от природы заместителей. Выявлено, что поли-2-оксиметилпарацисклопропилстирол частично растворим в воде и этаноле.

Выявлено, что радикальная полимеризация мономеров I-IV подчиняется общей закономерности, присущей полимеризации виниловых мономеров. Молекулярный вес полимеров колеблется от 20000 до 300000 в зависимости от заместителя, а также от условий полимеризации.

Особенность структуры синтезированных сополимеров, а именно наличие в звеньях макромолекулы циклопропанового кольца, этоксикарбонил, эпокси-, а также эписульфидных фрагментов, обусловило изучение их фотохимического структурирования с целью получения негативных фоторезистных материалов. Результаты фотохимических исследований показали, что полученные полимеры проявляют высокую фоточувствительность — 30—53 см²/Дж.

Кроме того, сополимер, полученный на основе мономера (I) проявляет оптическую прозрачность ($n_D^{20} = 1,5892$).

Таким образом, в результате исследований выявлено, что синтезированные полимеры обладают высокой фоточувствительностью, высоким показателем преломления, хорошей адгезией к подложкам и малой дефектностью пленок полимера.

РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫЙ СОПОЛИМЕР НА ОСНОВЕ 2-МЕТОКСИКАРБОНИЛПАРАЦИКЛОПРОПИЛСТИРОЛА И ГЛИЦИДИЛМЕТАКРИЛАТА

К.Г. Гулиев¹, С.Б. Мамедли¹, Ш.И. Багирова¹, Р.В. Джафаров², Р.М. Рзаев², А.М. Гулиев¹

¹Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайт; ipoma@science.az

²Азербайджанский государственный экономический университет, кафедра «Физики и химии»

Применяемые в настоящее время в полупроводниковой промышленности негативные фоторезисты еще не в достаточной мере удовлетворяют всем технологическим требованиям производства интегральных схем. Этим и объясняется неослабевающий интерес специалистов к получению новых типов негативных фоторезистов, отвечающих определенным целевым назначениям.

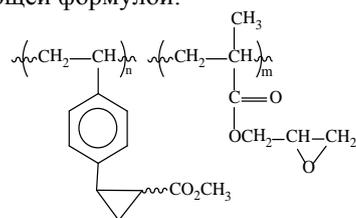
Настоящая работа посвящена синтезу полимерных светочувствительных соединений с целью создания на их основе новых негативных фоторезистов. В качестве объекта исследования был взят функциональнозамещенный сополимер 2-метоксикарбонилциклопропилстирола (МКЦС) с глицидилметакрилатом (ГМА). Получение сополимера на основе указанных мономеров происходит путем радикальной полимеризации в массе и в растворе бензола в присутствии динитрилизодиизомасляной кислоты.

МКЦС был получен взаимодействием п-дивинилбензола с метилдизаоацетатом в присутствии катализатора безводного CuSO_4 . Выход — 93%.

Полученный сополимер растворяется в хлорированных углеводородах, ацетоне, бензоле и др. В выбранных условиях полимеризация протекает гладко до образования сополимера с 85%-ным выходом.

Состав и структура полученного сополимера установлены на основе элементного и спектральных (ИК- и ПМР-) анализов. На основании этих данных выяснено, что полимеризация этих сомономеров протекает только по винильной двойной связи, с образованием сополимера, содержащего циклопропановое кольцо с метоксикарбонильным заместителем, а также эпоксидной группой, в боковых цепях макромолекул, что создает возможность фотохимических превращений.

Химическая структура сополимера выражается следующей формулой:



Содержание МКЦС И ГМА мономеров в сополимерах можно варьировать в пределах в зави-

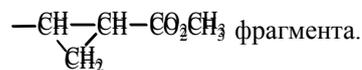
симости от состава исходной мономерной смеси. Молекулярный вес полимеров колеблется от 15000 до 360000, в зависимости от условий полимеризации, а также от состава исходной смеси мономеров. Состав сополимера определяли по данным эпоксидного числа.

Вычислены значения констант сополимеризации по Файнеману-Россу ($r_1 = 1,36$, $r_2 = 0,30$) и Q-e параметры по Алфрею-Прайсу.

Значения констант относительной активности мономеров свидетельствуют о высокой реакционной способности МКЦС, по сравнению с ГМА ($r_1 > r_2$), что, очевидно, связано с влиянием заместителя у циклопропанового кольца ($-\text{CO}_2\text{CH}_3$) фрагмента, обуславливающего высокую реакционную способность мономера.

Значение произведения величины констант сополимеризации ($r_1 \cdot r_2 < 1$), указывает на склонность мономерных звеньев к чередованию.

Значения Q_1 и e_1 говорят о возросшем сопряжении в мономере МЦПС, связанном с введением в паразоложение стирола



Особенность структуры синтезированных сополимеров, а именно наличие в звеньях макромолекулы циклопропанового кольца, глицидилового, а также карбонильного фрагментов, обусловило изучение их фотохимического структурирования. Выявлено, что при УФ-облучении пленка из полученного сополимера переходит в нерастворимое трехмерное состояние с помощью реакции фотосшивки между функциональными фоточувствительными группами, находящимися в боковой цепи макромолекулы.

Методом ИК-спектроскопии был изучен процесс структурирования сополимера. Показано, что фоточувствительность сополимера составляет $54,8 \text{ см}^2/\text{Дж}$. Относительной чертой полученного сополимера являются его высокие физико-механические и адгезионные свойства.

В результате проведенных исследований был получен новый сополимер, проявляющий высокую фоточувствительность, хорошую адгезию к подложкам и обладающий малой дефектностью.

Таким образом, полученный сополимер может быть использован в качестве основного компонента при изготовлении новых фоторезистов негативного типа.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОИАНИЛИНА ПОЛИВИНИЛПИРРОЛИДОНОМ И КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗОЙ

А.Н. Еремин¹, Х.А. Новик¹, Н.А. Иванова¹, Л.Н. Филиппович², С.Н. Шахаб²

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; yan47@mail.ru

²Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Окислительная полимеризация полианилина (ПАНИ) начинается в гомогенных условиях, но уже на начальной стадии и фазе роста становится гетерофазной, так как ПАНИ не растворяется в воде и органических растворителях. Если полимеризацию проводить в присутствии стерического стабилизатора, растворимого в реакционной среде, можно предотвратить осаждение полимера и получить дисперсию субмикронных частиц.

Цель работы — стабилизация водного золя ПАНИ поливинилпирролидоном (ПВП) разной молекулярной массы и карбоксиметилцеллюлозой (КМЦ).

В работе использовали ПВП с молекулярной массой, равной 10000 (ПВП10), 24000 (ПВП24), 40000 (ПВП40), 360000 (ПВП360) г/моль и КМЦ — с $M_w = 250000$.

Материалы и методы. Готовили два раствора: первый содержал 50 мкл конц. HCl, 11,4 мкл анилина и 438 мкл дист. воды, а второй — 45 мг $(NH_4)_2S_2O_8$, 60 мг ПВП или КМЦ, 26,7 мкл конц. HCl и 2,97 мл дист. воды. При перемешивании на магнитной мешалке в ледяной бане в раствор 2 через 10 мин вносили аликвоты раствора 1 по 25,8 мкл в течение 2 ч (13 добавок). После добавления всего объема раствора 1 синтез полианилина (ПАНИ) продолжали в прежних условиях еще 4 ч. В случае КМЦ ПАНИ синтезировали при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение. Наибольшей агрегативной и седиментационной стабильностью отличаются золи ПАНИ-КМЦ и ПАНИ-ПВП360. По-видимому, в среде ПВП360 и КМЦ частицы ПАНИ окружены объемной полимерной оболочкой, которую не в состоянии сформировать ПВП с меньшей молекулярной массой. Эффективность образования полимерной оболочки снижается с уменьшением концентрации КМЦ. Например, при 4,5 мг/мл КМЦ существенно замедляется синтез ПАНИ по сравнению с образцом, содержащим 9,0 или 13,5 мг/мл КМЦ. Кроме того, при меньшем содержании КМЦ ПАНИ формирует агрегаты (до ~7,5 мкм), легко различимые с помощью оптического микроскопа «Микро МБ» (Беларусь) при увеличении в 400 крат., которые не наблюдаются в случае 13,5 и 18,0 мг/мл КМЦ.

Наиболее полидисперсным является исходный золь ПАНИ, стабилизированный ПВП10, ПВП24 и ПВП360 (рис а, распределения 1, 2 и 4), а наименее полидисперсным — ПАНИ-ПВП24 (распределение 3), содержащий частицы с гидродинамическим диа-

метром от 1106 до 2305 нм, среди которых в максимальном количестве представлены агрегаты с размером 1484 нм. При разведении золя в большей степени разрушаются агрегаты ПАНИ, стабилизированные ПВП10 и ПВП24 (рис б, распределение 1 и 2). В золе ПАНИ-ПВП10, разведенном в 40 и 100 раз, максимальное динамическое рассеяние света проявляют частицы гидродинамического диаметра 394 и 362 нм соответственно. В то же время разведение золя ПАНИ-ПВП40 не приводит к разрушению его агрегатов: исходный золь содержит частицы диаметром от 1100 до 2300 нм, а разведенный в 40 раз — от 950 до 2300 нм. Образцы ПАНИ-ПВП360 и ПАНИ-ПВП10 являются сходными между собой по изменению гидродинамического диаметра при разведении золя, но не ПАНИ-ПВП40. В 40- и 100-кратно разведенном золе ПАНИ-ПВП360 максимально рассеивают свет частицы с диаметром 592 и 325 нм соответственно.

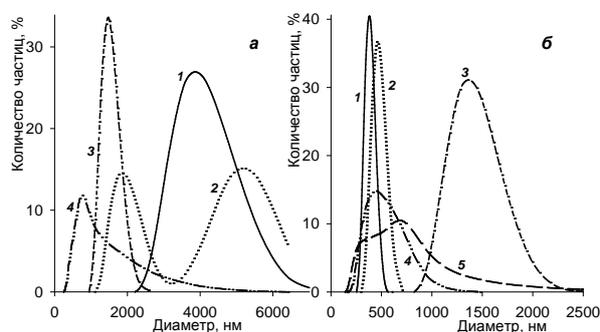


Рис. Распределение количества частиц ПАНИ-ПВП10 (1), ПАНИ-ПВП24 (2), ПАНИ-ПВП40 (3), ПАНИ-ПВП360 (4) и ПАНИ-КМЦ (5) по их гидродинамическому диаметру в исходном золе (а) и разведенном дистиллированной водой в 40 (б)

Золь ПАНИ-КМЦ включает агрегаты, гидродинамический диаметр которых изменяется от 140 до 3500 нм (рис б, распределение 5). В наибольшем количестве представлены частицы диаметром 712 и 340 нм. В то же время в растворе КМЦ в максимальном количестве содержатся частицы гидродинамического диаметра 295 нм. По-видимому, ПАНИ модифицирует поверхность таких агрегатов с образованием частиц размером 340 нм, которые, в основном, формируют димеры диаметром 712 нм, но в золе присутствуют и октамеры ПАНИ-КМЦ.

Таким образом, в синтезе ПАНИ наиболее эффективной стерической стабилизирующей добавкой является ПВП360 и КМЦ, то есть высокомолекулярные полимеры.

ДИСПЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ВОДНЫХ БИНАРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТ-ОЛИГОМЕР

П.Н. Логвиненко, Т.В. Дмитриева, В.В. Бойко,
Л.О. Карсим, Г.Ф. Невмержицкая, С.В. Рябов

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, Киев, Украина

Ограниченность запасов минерального сырья в мире, особенно нефти, газа и угля ставит в порядок дня использование природновозобновляемого сырья, например, продуктов переработки древесины, для решения технологических задач.

Известно, что растворы полимеров и олигомеров, в том числе природного происхождения, например, растворы Na-КМЦ, широко используются в качестве базовых при производстве СОЖ для механической обработки металлов, гидравлических жидкостей и закалочных сред. Однако, в ряде случаев возникает необходимость расширения диапазона физико-механических показателей, особенно реологических, поверхностно-активных и трибологических. Решение этой задачи представляется вполне возможным, используя способ модификации растворов полимеров малыми добавками олигомеров, например ПЭГ или их аминоксодержащими аналогами — моноанкерным (ПЭГ-1) и бианкерным (ПЭГ-2) [1].

Полиэлектролит Na-КМЦ и олигомерные добавки обладают хорошей совместной растворимостью в воде, что позволяет использовать их бинарные растворы в качестве базовых при приготовлении СОЖ для механической или абразивной обработки металлов, а это определяет целесообразность комплексного исследования водных бинарных композиций (ВБК) Na-КМЦ — ПЭГ, Na-КМЦ — ПЭГ-1, Na-КМЦ — ПЭГ-2.

Поверхностное натяжение $\gamma_{ж-г}$ ВБК Na-КМЦ — олигомер определяли по методу видоизмененной пластинки Вильгельми, а динамическую вязкость η_D — методом ротационной вискозиметрии.

Диспергирующие свойства ВБК изучали гравиметрическим методом на плоских образцах — дисках из стали (Ст.45) при абразивной обработке на машине трения.

Диспергирующее действие компонентов определяли по приросту съема ΔQ^K , т.е., по разнице между величиной съема металла в растворе Q^P и воде Q^B : $\Delta Q^K = Q^P - Q^B$.

Согласно полученным результатам, поверхностное натяжение ВБК в области концентраций 0, 0,5—1,0 вес.% ПЭГ400, ПЭГ400-1 и ПЭГ400-2 в 1%-ном растворе Na-КМЦ, на 8—10 мН/м ниже значений γ в водном растворе ПЭГ400, ПЭГ400-1 и ПЭГ400-2, что свидетельствует относительно высо-

кой поверхностной активности ВБК. Эффект снижения значений γ ВБК проявляется меньше при увеличении Мм ПЭГ от 400 до 4000, что можно объяснить более высокой поверхностной активностью индивидуальных молекул ПЭГ4000 и их аминоксодержащих аналогов. При этом значения γ ВБК с участием высокомолекулярного ПЭГ4000 и ПЭГ4000-1 ниже значений γ ВБК с ПЭГ400 на 2—4 мН/м, что свидетельствует об образовании более прочных интермолекулярных комплексов (ИМК) Na-КМЦ — ПЭГ4000 и Na-КМЦ — ПЭГ4000-1.

Данные тензиометрических исследований подтверждают результаты исследований реологических свойств ВБК, согласно которым на кривых концентрационной зависимости динамической вязкости ВБК Na-КМЦ — ПЭГ400-2 и Na-КМЦ — ПЭГ4000-1 наблюдается заметный максимум в области концентраций 0,1—0,3 вес.%.

Анализ кривых концентрационной зависимости значений ΔQ полимерных, олигомерных растворов и бинарных композиций Na-КМЦ — ПЭГ400, Na-КМЦ — ПЭГ400-1 и Na-КМЦ — ПЭГ400-2 показывает, что при соответствующих концентрациях аминоксодержащих олигомеров значения $\Delta Q^{ВБК}$ превышает аддитивную сумму значений ΔQ в полимерном (ΔQ^{PP}) и олигомерном (ΔQ^{OP}) растворах, что свидетельствует о синергизме влияния компонентов на диспергирующие свойства бинарных композиций. Синергизм диспергирующего действия коррелирует с величиной снижения значений как γ , так и повышения значений η_D в бинарных композициях, которые определяются межмолекулярным взаимодействием макромолекул полимера и олигомеров, характер и энергия которого зависит от варианта модификации ПЭГ. Увеличение Мм олигомеров от 400 до 4000 существенно влияет на диспергирующие свойства бинарных композиций, о чем свидетельствует инверсия синергизма в антагонизм диспергирующего действия олигомеров ПЭГ4000-1 и ПЭГ-4000-2 соответственно.

1. Логвиненко П.Н., Бойко В.В., Рябов С.В. Получение аминоксодержащих олигомеров модификацией полиэтиленгликолей и изучение свойств их водных растворов // Тезисы докладов. IX Междунар. конф. по химии и физико-химии олигомеров "Олигомеры-2005". 13—16 сентября, 2005. — Одесса. — 2005, 161

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМОННЫХ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; rogachevav@mail.ru.

Введение. Плазмонное резонансное поглощение характерно для наноконпозиционных металлсодержащих полимерных покрытий, обладающих достаточно низкой плотностью проводящих частиц и относительно узким их распределением по размеру (в диапазоне 1...5 нм). При этом параметры поглощения определяются химическими свойствами полимерной матрицы, природой межфазного взаимодействия, что используется при создании новых материалов с нелинейными оптическими свойствами, в частности элементов сенсоров.

Цель работы — определение закономерностей осаждения плазмонных металл-полимерных покрытий их газовой фазы, образующейся электроннолучевым диспергированием полимера и испарением соли металла.

Материалы и методы. Покрытия осаждали из газовой фазы, формируемой воздействием на мишень низкоэнергетического потока электронов с энергией 800—1600 эВ и плотностью тока 0,01—0,03 А/см². Процесс осаждения покрытий производился в вакуумной камере при начальном давлении остаточных газов $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ Па. Диспергирование осуществляли как в условиях лазерного ассистирования (в качестве источника лазерного излучения применялся лазер L-2137U+HG-5), так и без него. В качестве материала мишени использовали смеси порошков полимеров ПТФЭ, ПММА, полиэтиленгликоля и соли металлов AgNO₃, Zn(CH₃COO)₂·2H₂O, AgBr. Подложками при проведении ИК, ВИД спектроскопии служили пластины NaCl, атомно-силовых исследований — пластины монокристалла кремния. Термообработку сформированных покрытий осуществляли в вакууме при температуре до 500 °С в течение 60 минут.

Результаты и обсуждение. Установлено, что при воздействии электронов на мишень, содержащую полимер и соль металла, происходит ее разложение и образующиеся наночастицы переносятся летучими продуктами диспергирования полимера на поверхность подложки. При этом практически всегда в покрытии регистрируется наличие соли. Поэтому проведение дополнительного отжига таких покрытий является, как правило, необходимым условием формирования однородных систем. На примере покрытий, полученных диспергированием смеси полиэтиленгликоль-AgNO₃ показано, что наиболее интенсивное плазмонное поглощение наблюдается при определенных режимах термообработки покрытий. Нагрев его до высокой температуры приводит к интенсификации процессов коалесценции, образованию крупных частиц, не проявляющих резонансное поглощение.

Отметим также, что термообработка соли при оптимальных режимах в присутствии полимера позволяет формировать в полимерной матрице систему изолированных наночастиц металла.

С целью повышения однородности осаждаемых металл-полимерных слоев предлагается процесс электроннолучевого диспергирования проводить в условиях лазерного ассистирования. Сформированное в условиях лазерного ассистирующего воздействия покрытие характеризовалось широким плазмонным пиком. В электронном спектре покрытия, осажденного из газовой фазы в отсутствие лазерного воздействия, практически отсутствовало какое-либо поглощение. Установлено также, что лазерное ультрафиолетовое ассистирующее воздействие на ПММА дополнительно инициирует процессы деструкции по реакциям Норриша I и II типов, что в сочетании с активационной обработкой генерируемых низкомолекулярных фрагментов первичным и вторичным электронным потоком приводит к интенсификации процессов вторичной полимеризации, к формированию более гладких покрытий и, как показали результаты ИК-спектроскопии, с меньшим содержанием боковых кислородсодержащих групп [1].

В целом, при формировании покрытий в условиях лазерного ассистирования электроннолучевого диспергирования более активно протекают процессы образования наночастиц серебра, которые при последующем отжиге оказывают автокаталитическое влияние на процессы разложения соли. Дополнительная термообработка приводит к формированию более однородной структуры с меньшей высотой выступов. Показано, что лазерное ассистирующее воздействие при электронно-лучевом диспергировании смеси порошков ацетата цинка и ПЭ инициирует разложение соли цинка и образование наностержней оксида цинка в покрытии ПЭ.

Композиционные покрытия на основе ПММА и ацетата цинка, осажденные без лазерного ассистирования после термообработки при 200 °С, имеют плазмонное поглощение вблизи 338 нм (3,4 эВ). Методом АСМ установлено наличие в матрице ПММА достаточно крупных не сплошных образований, имеющих слоистую структуру.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора № Т16КИГ-001 от 20.07.2016 г.

1. Микро- и наноконпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые их активной газовой фазы / Под. ред. А. В. Рогачева. — М.: Радиотехника. — 2016

МОДИФИКАЦИЯ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.А. Савицкая¹, И.М. Кимленко¹, В.Е. Гайшун², Я.А. Косенок²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; savitskayata@bsu.by

²Гомельский государственный университет, Гомель, Беларусь

Введение. Анализ опыта различных стран в решении проблемы энергосбережения показывает, что одним из наиболее эффективных путей является сокращение потерь тепла через ограждающие конструкции зданий, сооружений и промышленного оборудования за счет использования теплоизоляционных материалов. Важной составляющей теплоизоляционных материалов, оказывающей большое влияние на эксплуатационные и теплофизические характеристики утеплителей, являются полимерные связующие [1,2]. При этом модификация связующего и оптимизация его состава для получения композитов с улучшенными характеристиками является важной и актуальной задачей.

Цель работы — изучение влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) и полимеров различной природы на свойства фенолформальдегидной смолы, применяемой в качестве связующего в производстве теплоизоляционных материалов.

Материалы и методы. Объектом исследования являлась фенолформальдегидная смола резольного типа Фенотам-Н201М. Исследования совместности и влияния различных добавок на свойства смолы проводили на примере анионогенного (додецилсульфат натрия, ДДС) и неионогенного (полиэтиленгликоль ПЭГ) ПАВ, а также этиленгликоля (ЭГ) и поливинилпирроллидона (ПВП). Физико-химические свойства смолы с добавками и без изучали по стандартным методикам с использованием турбидиметрического, сталагмометрического и др. методов.

Результаты и обсуждение. Определены физико-химические свойства фенолформальдегидной смолы Фенотам-Н201М, включая плотность, щелочность, содержание сухого вещества, мутность, время отверждения, поверхностное натяжение и содержание свободного формальдегида.

Результаты исследования свидетельствуют, что изученная фенолформальдегидная смола характеризуется крайне низким содержанием свободного формальдегида, что отвечает современным тенденциям по использованию экологически чистых материалов. Значения рН и щелочности смолы свидетельствуют об участии в конденсации исходных продуктов щелочных катализаторов. Относительно низкое значение щелочности смолы (менее 2,5%) может приводить к преждевременному ее отверждению при действии высоких температур [3], поэтому при определенных условиях необходимы добавки

веществ, снижающих скорость отверждения.

Изучено влияние ПАВ и полимеров на показатели рН, мутности, время отверждения и поверхностное натяжение смолы.

Определено время перехода смолы из состояния резола в состояние резитола и резита (табл. 1).

Таблица 1. Время отверждения смолы, мин

	Резитол	Резит
Смола чистая	40	95
Смола+ ЭГ	50	140
Смола+ ПВП	50	120
Смола+ ДДС	70	100
Смола+ ПЭГ	90	120

Результаты исследования свидетельствуют, что добавки ПАВ и полимеров увеличивают время отверждения фенолформальдегидной смолы, что является преимуществом при изготовлении теплоизоляционных материалов. Замедление отверждения создает оптимальные условия для придания материалам требуемой формы.

Показано, что мутность смолы меняется в зависимости от используемой добавки, что свидетельствует о разной природе взаимодействия добавок с фенолформальдегидной смолой. Установлено, что изученные добавки в основном снижают поверхностное натяжение смолы, что способствует лучшему смачиванию связующим материалов. Наибольшее снижение поверхностного натяжения смолы происходит при добавлении ЭГ. В целом, ЭГ повышает срок хранения смол и улучшает физико-химические показатели теплоизоляционных изделий в результате реакции сополиконденсации с фенолспиртами. По всей видимости, ПВП выполняет роль слабодиссоциирующего ПАВ и уменьшает каплеобразование. ПЭГ, вытесняя воду, придает изделиям стабильность, предотвращает деформацию и усадку.

Установлено, что с помощью добавок можно регулировать физико-химические свойства связующего с целью придания теплоизоляционным материалам улучшенных характеристик.

1. Киселев И.Я. Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры. // Строительные материалы. — 2003 (7)
2. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. — М.: Высш. шк. — 2003
3. Дружинин А.В., Говоров Г.Г., Савина В.В. Технология клеевых материалов. — Екатеринбург. — 2008

НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЁНКИ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА И ПОЛИСТИРОЛА, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ В ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА АРГОНА

А.В. Смирнов, В.С. Аткин, И.Д. Осыко, И.В. Синёв

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Саратов, Россия; smirnov-sgu@yandex.ru

Цель работы — исследование возможности получения металл-полимерного композитного покрытия с поверхностью модифицированной в плазме высокочастотного разряда аргона (13,56 МГц).

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовался порошок вольфрама (W, средний размер частиц 0,8 мкм) и гранулы полистирола (ПС, размер гранул 3 мм). Для уменьшения среднего размера частиц металла, W подвергался совместной с ПС обработке в шаровой планетарной микромельнице Pulverisette 7 (Fritsch, Германия), соотношение металла к полимеру при помоле 9:1. Полученный в результате помола порошок W+ПС помещался в пробирку с органическим растворителем CCl₄, в соотношении 1:10 по весу. Полученная суспензия подвергалась обработке в УЗ ванне в течении 20 минут с периодическим помешиванием. После обработки пробирка отстаивалась в течении 72 часов. Металл-полимерное покрытие получалось путём диспергирования полученной суспензии на поверхность подложки (полированная пластина кремния). Средний размер частиц оценивался с помощью программы Gwyddion по микрофотографиям скола образца. Анализ функций распределения показал наличие двух фракций. Больше 80% частиц со средним размером 65 нм и оставшиеся со средним размером 130 нм.

Поверхность тонких плёнок модифицировалась в плазме высокочастотного разряда аргона в соответствии с продемонстрированной в работе [1] методикой. Морфологический анализ проводился с использованием электронного растрового микроскопа Mira II (Tescan, Чехия).

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлено изображение: а — поверхности и б — скола плёнки. Микрофотографии получены в режиме BSE (отражённых электронов). BSE режим позволяет определить наличие включений микрочастиц вольфрама. Средняя толщина плёнки составляет порядка 3,5 мкм. На поверхности наблюдается наличие пор различной формы глубиной от 1 до 3 мкм. Влияние плазменной модификации на морфологию поверхности объясняется в работе [2]. В объёме плёнки не наблюдается наличие агломератов частиц вольфрама. Частицы равномерно распределены по объёму плёнки.

Выводы Таким образом, представленный способ формирования металлополимерного композиционного покрытия позволяет достигать равномерного распределения наночастиц по объёму. А плазменная

модификация формировать на поверхности открытые поры для иммобилизации биологических объектов.

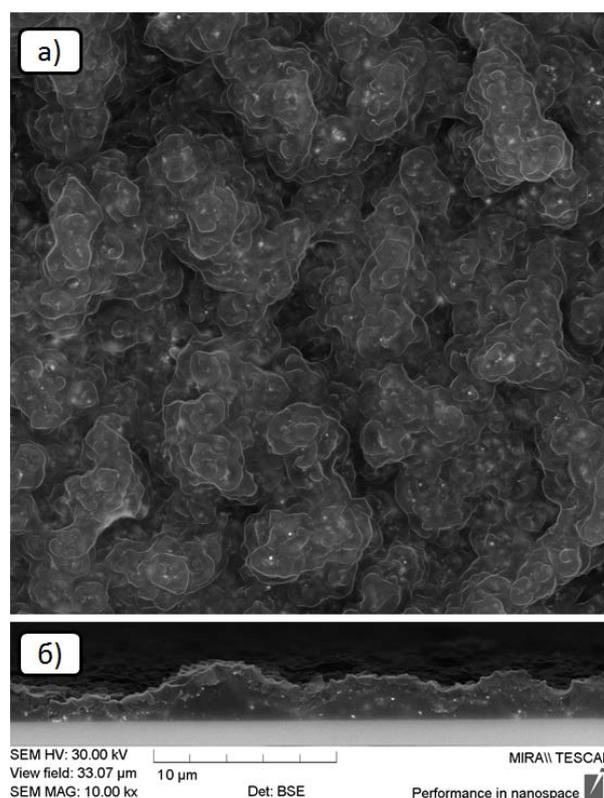


Рис. 1. СЭМ-изображение: а — поверхности и б — скола плёнки.

Подобные покрытия имеют перспективы применения в качестве сенсорного слоя в акустических биосенсорах. Возможность изменения количества металлического наполнителя позволяет изменять акустические свойства материала и подбирать необходимые параметры композиционного покрытия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00633 мол_а, № 16-07-00821-а и при поддержке Совета по грантам Президента РФ (СП-677.2015.4)

1. Смирнов А.В. и др. Модификация тонких пленок полистирола в плазме высокочастотного магнетронного разряда // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии (БелСЗМ-2016): сборник докл. XII Международной конф. — Беларусь. наука. — 2016, 149—152
2. Smirnov A.V., et al. Surface Modification of Polystyrene Thin Films by RF Plasma Treatment // BioNanoScience. — 2017, 1—6 DOI: 10.1007/s12668-017-0407-1

СОЗДАНИЕ (БИО)РАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРИРОДНО-ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ

Т.В. Травинская, А.Н. Брыкова, Ю.В. Савельев

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, Киев, Украина;
travinskaya-tamara@rambler.ru

Введение. Насущной проблемой современной химии является необходимость создания экологически безопасных полимерных материалов, сохраняющих свои свойства в процессе эксплуатации и разлагающихся в условиях окружающей среды после окончания срока использования.

Цель. Целью данного исследования является получение новых иономерных полиуретанов (ИПУ) многофункционального назначения на основе возобновляемого растительного сырья, способных к регулируемой деструкции под воздействием различных факторов окружающей среды.

Материалы и методы. В данной работе получены и исследованы свойства и способность к (био)разложению композиционных пленкообразующих иономерных полиуретанов алифатической природы на основе касторового масла и микробного экзополисахарида — ксантана, ($C_{35}H_{49}O_{29}$)_n *Xantomonas campestris* pv *campestris* (ММ 2000000—5000000). В процессе работы были синтезированы иономерные полиуретановые дисперсии (ИПУ), содержащие в макроцепи ксантан (Кс) (0,2—30 мас.%); ИПУ, содержащие в макроцепи касторовое масло (КМ) (10—50 мас.%), а также были получены ИПУ, содержащие в макроцепи одновременно КМ (25%) и Кс (20%). В качестве объекта сравнения был выбран ИПУ, синтезированный реакцией изоцианатного прекурсора на основе полиокситетраметиленгликоля (ММ = 1000) и гексаметилендиизоцианата в мольном соотношении 1:2, соответственно, (время реакции 2 ч, температура 80 °С) с диметилпропионовой кислотой, с последующим удлинением цепи водой. Методом обращения фаз были получены пленкообразующие опалесцирующие дисперсии [1].

Исследованы коллоидно-химические характеристики водных дисперсий ИПУ, физико-механические свойства пленочных материалов, молекулярная и надмолекулярная структура синтезированных образцов, а также изучено влияние на образцы кислот и щелочной сред. Исследована скорость деградации ИПУ в модельных условиях окружающей среды.

Результаты и обсуждение. Структурно-химическое модифицирование ксантаном ИПУ-матрицы подтверждено путем сравнения экспериментальной рентгеновской дифрактограммы и расчетной в предположении аддитивных вкладов ИПУ и Кс в

дифракционную картину их композиции, что проявляется в различиях аморфно-кристаллической структуры Кс. ИПУ/25КМ и ИПУ/25КМ/20Кс характеризуются аморфной структурой (рис. 1).

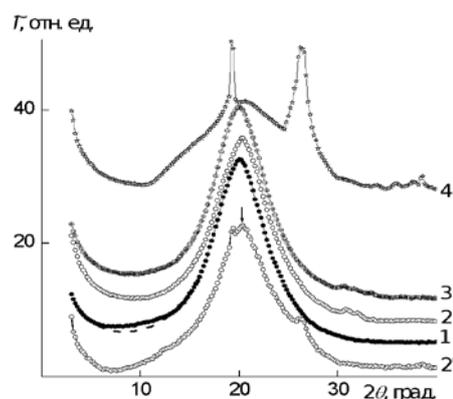


Рис. 1. Широкоугольные рентгеновские дифрактограммы ИПУ: 1 — ИПУ/25КМ; 2, 2' — ИПУ/20Кс (2, 2' — экспериментальная и аддитивная дифрактограммы, соответственно), 3 — ИПУ/25КМ/20Кс; 4 — Кс

Гомогенность структуры ИПУ/20Кс можно объяснить высоким уровнем межмолекулярного физического взаимодействия составляющих макроцепи по сравнению с ИПУ/25КМ/20Кс. Влияние состава ИПУ, содержащих структурные модификаторы на показатели потери массы и pH почвы исследовано в модельных условиях в течение 6 мес. Определение микрофлоры почвы показало присутствие грибов родов *Rhizopus*, *Aspergillus*, *Penicillium*. Потеря массы образцами растёт с увеличением продолжительности эксперимента и за 6 мес. составляет 11,3—68%, что превышает содержание природно-восстанавливаемых составляющих в 2 раза, а указанную характеристику матрицы в 3,8—23 раза. Через 30 суток воздействия агрессивных сред происходит фрагментация пленочных образцов, которая возрастает с увеличением содержания Кс. Показано, что химически связанные возобновляемые составляющие ИПУ способствуют процессам деградации.

1. Пат. 93372 Украина, МПК⁵¹ C08J 3/02, C08G 18/10, C08L 5/00 Спосіб отримання полімерної біодеструкуючої композиції, Савельєв Ю.В., Травінська Т.В., Марковська Л.А., Брыкова О.М. — Опубл. 25.09.2014. — Бюл. № 18

ОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОТОКОМ ПОРОШКОВЫХ ЧАСТИЦ

Ю.С. Ушеренко¹, С.М. Ушеренко¹, Т.В. Петлицкая²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; osher_yu@mail.ru

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» — управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

Введение. В настоящее время существует большое разнообразие полимерных материалов, которые широко используются в качестве конструктивных, тепло- и электроизоляционных материалов. Основными достоинствами полимеров являются высокая эластичность, низкая плотность, прочность при ударе, специфические электрические свойства, высокая стойкость к воздействию различных активных сред, возможность их получения с заданным комплексом механических и физических свойств. Однако результатов перепрошивки полимеров в композиты крайне мало [1—2].

Цель работы — исследование воздействия процессов динамического легирования и высокочастотного облучения при прошивке полимерных материалов.

Материалы и методы. Как модельный материал использовали бесцветный полиуретановый пластик с низкой вязкостью, а также полимерная матрица с алюминиевым наполнителем (рис. 1, а, б). После прошивки микрочастицами изготовлены образцы композиционного материала на этой основе.

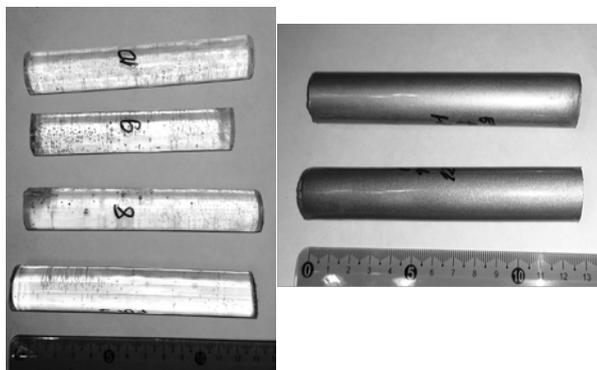


Рис. 1. Экспериментальные образцы из прозрачного полимера — (а), на основе полимерной матрицы и алюминиевого наполнителя (б)

Динамическая обработка в режиме сверхглубокого проникания (СГП) на пушечном ускорителе проводилась в условиях: скорость частиц 300—1000 м/с, время выдержки ~ 100 мкс, материал ударников — различные фракции SiC — 3—100 мкм [3].

Исследование образцов проводилось с помощью оптической и растровой электронной микроскопии. Испытания на ударную вязкость (динамический изгиб) проводили на ротационном копре РСО

по методу Шарпи, размеры образцов — стандартные (10 x 10 x 55 мм) с надрезом. Твердость измерялась дюрометром Шора тип D.

Результаты и обсуждение. Плотность модельного материала составляет 1,07 г/см³, предел прочности на разрыв 21,8 МПа, твердостью 76 HSD, с алюминиевым наполнителем — 63 HSD. Ударная вязкость модельного материала составила 37,5 кДж/м², с алюминиевым наполнителем — 25, кДж/м².

В результате проведенной серии испытаний установлено, что экспериментальные полимерные образцы и образцы на основе полимерной матрицы и порошкового алюминиевого наполнителя выдерживают динамическую нагрузку в 600 м/с без разрушения. Изменение ударной вязкости также не отмечено.

Обнаружена прошивка пластика в виде канальных элементов (рис. 2), подтверждающая реализацию высокоэнергетического процесса сверхглубокого проникания в полимерных материалах.

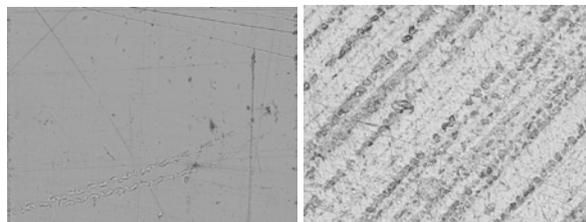


Рис. 2. Структура экспериментальных образцов полимерного материала до (а) и после (б) динамической обработки -

Вывод. Создание канальных элементов доказывает отсутствие защиты пластиком от сгустков космической пыли и обуславливает объемную обработку пластика.

1. Арсланов В.В. Физико-химия процессов формирования и разрушения переходных композиционных зон адгезионных соединений полимер/металл. Специальность 02.00.04 — Физическая химия. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра хим. наук. — М. — 1989
2. Фиговский О.Л., Готлиб Е.М., Наумов С.В. применении метода сверхглубокого проникновения для получения полимерных нанокompозитов // Вестник Казанского технологического университета. — 2010, № 9, 688—690
3. Usherenko Y., Usherenko S., and Yazdani J. High-Energy Method of Transformation of Casting Metals and Alloys to the Composite Materials // Key Engineering Materials. — 2016 (721), 290—294

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ФОТОРЕЗИСТА ФП9120, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ P⁺ И B⁺

Д.В. Шестовский¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Известно, что модификация полимеров с помощью ионной имплантации приводит к изменениям их проводящих свойств от величин, характерных для хороших изоляторов, до величин, которые демонстрируют полупроводниковые материалы и даже металлы [1]. Полимерные пленки фоторезиста, в частности ФП9120, который представляет собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенолформальдегидной смолы, широко применяются в технологических процессах ионно-лучевой фотолитографии для изготовления полупроводниковых приборов [2].

Цель работы — выяснение возможности изменения электрических характеристик фоторезиста ФП9120, имплантированного ионами P⁺ и B⁺ и широко используемого в производстве полупроводниковых приборов, что может найти применение в электронике для изготовления нанопроводящих диэлектриков.

Материалы и методы. Пленка фоторезиста толщиной 1,8 мкм наносилась на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Имплантация ионами P⁺ и B⁺ с энергией 60 кэВ в интервале доз от $6 \cdot 10^{14}$ см⁻² до $1,2 \cdot 10^{16}$ см⁻² производилась в режиме постоянного ионного тока при плотности 10 мкА/см².

Расчет пробегов ионов производился с помощью программы SRIM-2012. При модификации поверхности ионами P⁺ глубина модифицированного слоя составила 0,2 мкм, а при легировании ионами B⁺ — 0,4 мкм.

Для проведения электрических измерений вырезались образцы размером 4×4 мм. На поверхность каждого образца наносились два электрических контакта серебряной электропроводящей пастой на эпоксидной основе, в которую до полимеризации вставлялись медные проволочки.

Удельное сопротивление модифицированного слоя определялось квазичетырехзондовым методом путем измерения тока и напряжения (микровольтамперметр EMG-1352) с использованием геометрических размеров образца (расстояние между контактами, ширина и толщина проводящего слоя).

Результаты и обсуждение. На рис. 1 показана дозовая зависимость удельного сопротивления модифицированного слоя фоторезиста, имплантированного ионами P⁺ и B⁺. Как видно, наиболее резкое уменьшение сопротивления характерно для первых доз имплантации, при дальнейшем увеличении дозы оно практически не уменьшается.

Так при имплантации P⁺ удельное сопротивление

уменьшилось до 30 раз, а при имплантации B⁺ — до 7 раз.

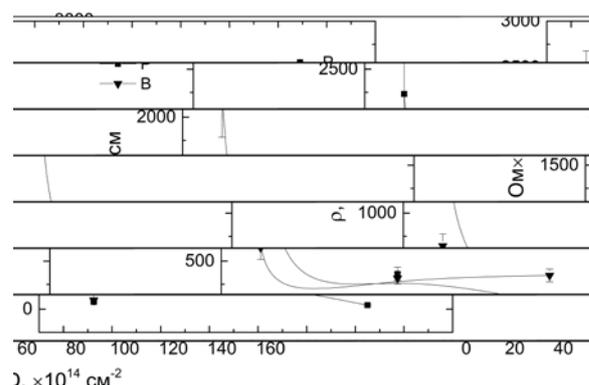


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления приповерхностного модифицированного слоя фоторезиста ФП9120, имплантированного ионами P⁺ и B⁺, от дозы имплантации

Увеличение электропроводности полимеров при ионной имплантации в первую очередь обусловлено карбонизацией приповерхностного слоя вследствие разрыва химических связей и образования графитоподобных кластеров, а также формированием металлических частиц при имплантации ионов металлов [1].

Слабая зависимость удельного сопротивления модифицированных слоёв при дозах больше $6 \cdot 10^{14}$ см⁻² может свидетельствовать о том, что основным механизмом увеличения электропроводности при имплантации P⁺ и B⁺ является формирование карбонизированной фазы. Причем уже при дозе $12 \cdot 10^{14}$ см⁻² процесс карбонизации полностью завершается, что и приводит к насыщению дозовой зависимости удельного сопротивления.

Таким образом, увеличение электропроводности фоторезиста ФП9120 при имплантации ионами P⁺ и B⁺ в основном определяется процессами формирования углеродной фазы, карбонизация которой завершается при дозе $12 \cdot 10^{14}$ см⁻² [3].

1. Оджаяев В.Б., Козлов И.П., Попок В.Н., Свиридов Д.В. Ионная имплантация полимеров. — Мн. — 1998
2. Просолович В.С., Бринкевич Д.И., Янковский Ю.Н., Релаксация упругих напряжений вблизи поверхности диазохиноноволачного резиста при ионной имплантации // 11-я Международная конференция «ВИТТ». — Мн. — 2015, 144—146
3. Волобуев В.С. Структурные, электронно-транспортные и оптические свойства пленок полиэтилентерефталата и фоторезиста, имплантированных ионами металлов // Диссертация на соискание ученой степени. — Мн. — 2012

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 4

Трибоматериаловедение

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

MODELLING OF MICROSTRUCTURE AND ANALYSIS OF ABRASIVE WEAR OF MANUAL ARC WELDED LAYERS OF HADFIELD STEEL

V. Jankauskas¹, R. Choteborsky², M. Antonov³, and E. Katinas¹

¹Aleksandras Stulginskis University, Akademija, Kaunas district, Lithuania, vytenis.jankauskas@asu.lt

²Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

³Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia

This article is presenting results of analytical and experimental study of the microstructures of deposited layers of Hadfield steel (basic; alloyed with Cr, Ni, Mo and B; alloyed and reinforced by WC). Austenitic microstructure was prevailing in basic and alloyed Hadfield steel. Analytical investigation shows that content of austenitic structure is 95—99% while in the case of reinforced material the content is 50—56% (the rest is tungsten carbide, cementite, etc.). Practical investigation of microstructures confirmed the results of analytical predictions. It was observed that reinforcement of steel by tungsten carbide leads to reduction of content of austenite that can positively or negatively influence wear resistance of material depending on wear conditions.

The plowshare, moldboards, buckets and other elements of agricultural and construction machinery operate under impact-abrasive wear. Often these parts of the machines are made of Hadfield's steel, which was developed in 1882 by the English metallurgist Robert Hadfield. The surface of austenitic Hadfield steel (11—14.5% Mn, 0.9—1.3% C, HB 186—229, $\sigma_b = 654—830$ MPa) is strongly riveted under impact loads [1, 2] and has a high wear resistance (abrasion) at high pressures or impact loads. Steel, which is under the surface and not subjected to stress, has a high plasticity and toughness, which guarantees exceptional reliability of the parts.

Methods. Hadfield steel electrodes was made in JSC “Anykščių varis”. In the same company samples was welded on SJ355 steel and identified chemical composition. In this work was created model for microstructure analysis by given content of Hadfield electrodes with reinforcement of WC particles. Microstructure images of samples created by microscope Nikon Eclipse MA-100. Two types of abrasive wear experiments was made: abrasive wear by ASTM G65 and erosion test by GOST 23.201-78. Abrasive wear experiments maded with two discs: rubber and steel to imitate low and high contact pressures. Erosive wear test was made at 10, 30, 50 and 80 m·s⁻¹ abrasive particle speed.

Results. Microstructure analysis was made Elmer-Solver and SciLab programs. Fig. 1 showing virtual sample which has modelled welding bead. This model showed austenitic, ferritic and other metal content in alloy.

Abrasive wear test with rubber disc (fig. 2) showed that reinforcement of tungsten carbide reduced wear but steel disc showing similar wear resistance as without reinforcement.

Erosive wear test showing that samples with reinforcement reduce wear loss at all tested speeds.

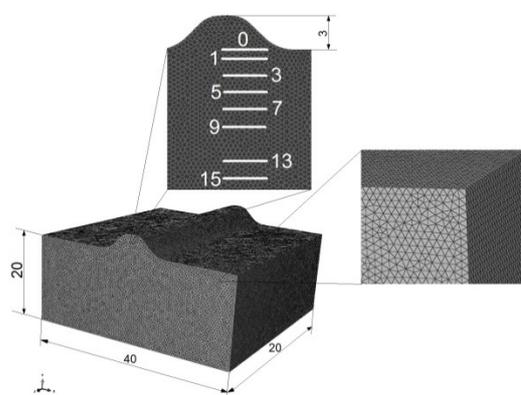


Fig. 1. Scheme of FEM sample with a welded bead (3 mm high) and measured temperature points.

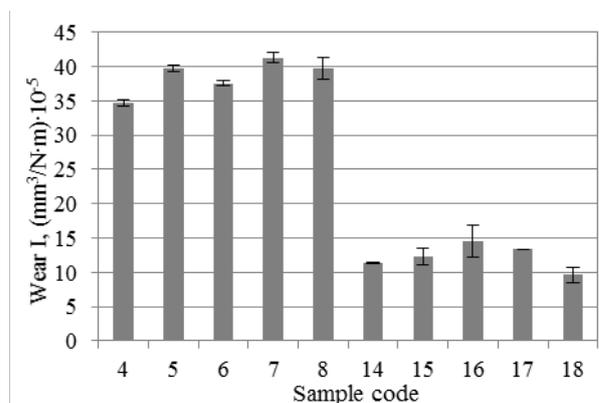


Fig. 2. Abrasive wear test results with rubber disc

1. ASM Handbook, Vol. 1. Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. — 2005
2. Мирзаев Д. А., Корягин Ю. Д., Окишев К. Ю. Влияние металлургических факторов на механические свойства и износостойкость литых марганцовистых сталей. Физическая химия и технология неорганических материалов // Известия Челябинского научного центра. — 1999, № 3, 18—22

THE EFFECT OF DOPPED FULLERENE-LIKE TUNGSTENE/MOLYBDENUM DISULFIDE NANOPARTICLES ON FRICTION, WEAR, AND ELECTRICAL PROPERTIES

Alex Laikhtman¹, Lev Rapoport¹, and Meltem Sezen²

¹Holon Institute of Technology (HIT), Holon, ISRAEL, alex1@hit.ac.il

²Sabancı University Nanotechnology Research and Application Center (SUNUM), Istanbul, Turkey

Inorganic fullerene-like (IF) nanoparticles (NP) of WS₂ and MoS₂ exhibit very good tribological behavior as additives to lubricating fluids and as self-lubricating coatings and for improving the mechanical behavior of nanocomposites. Since the IF NP of WS₂ and MoS₂ are semi-conducting materials, the conduction electrons near the NP surface are expected to affect many of their properties including their friction and wear behavior. It is believed that the excess electrons produced by the substitutional doping by such atoms like rhenium, niobium or gallium are trapped by defects on the NP surface. The negatively charged colloidal NP, which are surrounded by a positively charged ionic atmosphere, repel each other at close proximity and are therefore much less agglomerated than their undoped counterparts [1].

The doped NP were characterized by different methods. In particular, the Re atoms at concentrations < 0.1 at.% were found to substitute the Mo or W lattice atoms and donate electron to the conduction band making the NP negatively charged. Application of Re-IF-MoS₂ NP provides an ultra-low friction coefficient and a very low wear rate, as illustrated in Fig. 1.

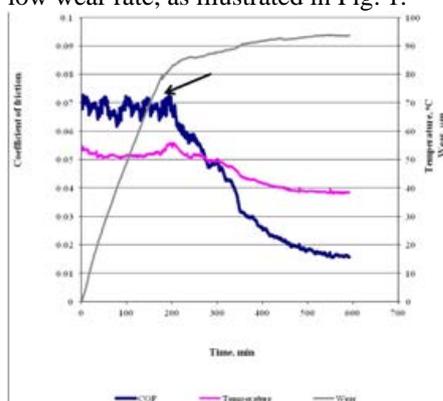


Fig. 1. Dependence of the friction coefficient, temperature and wear vs. time

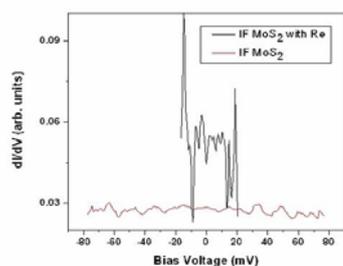


Fig. 2. STS spectra of IF-MoS₂ and Re-doped (0.12 at.%) IF-MoS₂ NP

The unique tribological properties of Re-doped

MoS₂ NP can be related to the rolling effect of the NP and tribocharging of the tribofilms by the surface layer of Re:IF-MoS₂ NP. Based on the scanning tunneling spectroscopy (STS) analysis shown in Fig. 2, it is suggested that the Re doped NP are more conductive than undoped MoS₂ NP. SEM, AFM and a measurement of the electrical resistance demonstrate formation of a smooth and dense Re-IF-MoS₂ solid lubricant film on the rubbed surfaces (see Fig. 3).

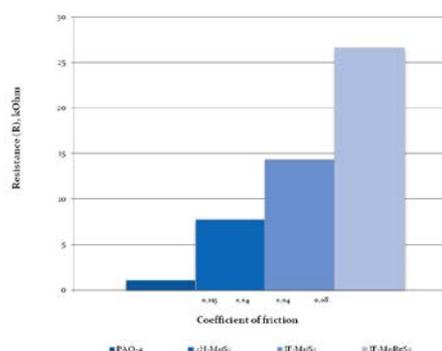


Fig. 3. Electrical resistance of the disks rubbed with pure oil and oil with 2H-MoS₂, IF-MoS₂ and Re-IF-MoS₂ NP

Another, promising approach to dope NP of MoS₂ and WS₂ is by focused ion beam (FIB) etching. This method was already applied for ion implantation into different materials with the objective to apply this technology as an alternative method for fabricating semiconductor devices [2]. When using the Ga⁺ ion dose of 1—3×10¹⁵ cm⁻², the resultant structural damage is minor and the characteristic bands in the micro-Raman spectra taken from ion-exposed WS₂ samples are mostly identical to the pristine WS₂ NP. Nevertheless, even at these low ion doses FIB irradiation, Ga atoms penetrated to the NP to the concentrations of 0.3—0.6 at.%, as measured by EDS.

FIB-induced implantation of Ga to WS₂ NP to the above concentrations may considerably affect their electronic and electrical properties. In order to determine the modifications induced by the Ga⁺ FIB irradiation in the WS₂ NP, various measurements will be applied like four point probe I-V electrical measurements, scanning tunneling spectroscopy (STS), SQUID magnetometry (superconducting quantum interference device), etc.

1. Rapoport L., Moshkovich A., Perfilyev V., Laikhtman A., Lapsker I., Yadgarov L., R. Rosentsveig, and Tenne R. // Trib. Lett. — 2012 (45), 257
2. C. A. Volkert, A. M. Minor // MRS Bulletin. — 2007 (32), 389

INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT ON THE OPERATION PROPERTIES OF PIEZO-ELECTRIC ACTUATORS

J. Padgurskas¹, A. Žunda¹, R. Rukuiža¹, V. Michailov², and A. Andriušis¹

¹Aleksandras Stulginskis University, Kaunas, Lithuania

²Boris Lazarenko Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova, Chisinau, Moldova

The mechanical characteristic and longevity of piezo-electric actuators (PEA) depend on tribological material of rotor's surface coat or its modification using surface processing methods. The purpose of this work was to determine the tribological effect of differently processed coatings and different friction elements on the operation efficiency of piezo-electric actuator when using the different frictional contact materials. We analyzed the electrospark alloying with cermet 12C2, BK6M carbide coating, coating STELLITE B3K. Piezo-electric actuator work was evaluated by speed stability and load-bearing capacity (loading output torque).

Keywords: piezo-electric actuator, ultrasonic motor, surface processing, rotation speed, loading torque.

Introduction

Piezoelectric gears-micro-actuators widely used in high precision positioning equipment.

Development of piezoelectric gears use is limited by the wears of contact elements (deficit of durability). The specific materials (ceramic, steel, glass, plastics) are used in friction pairs like mentioned. Peculiarities of mechanical movement transfer in such gears are based on high frequency resonance vibrations transfer in to the alternate friction of contact zone. So the tribological reliability here is very important. The modeling of the work conditions of piezo-electric friction pairs (PEFP) is problematic because of high frequency vibrations (20...500 kHz) and bidirectional small amplitude (0,5...5 μm) trajectory [1, 2]. The condition such as that is similar to fretting wear. When applied load is of high frequency (intensive dynamic) the analytical calculations of contact loads are only rough (researches not found). Therefore, in lot of cases the experiments are performed.

Metology

Tests of piezo-electric gear (ultrasonic actuator) was performed with self-made test equipment, designed and constructed by scientists from Tribology laboratory in the Institute of power and transport machinery engineering of Aleksandras Stulginskis University. This device allowed testing the PEA under the fixed load, record the torque developed by PEA and the rotating speed of rotor during the all test time. As friction element (FE) the micro shoe of industrial epoxy rubber (ER) for one case, and ER modified with SiO₂ sand in the second

case of test conditions Point of modification ER with SiO₂ was change the friction coefficient and hardness of friction element.

Principal scheme of investigated contact presented in fig. 1.

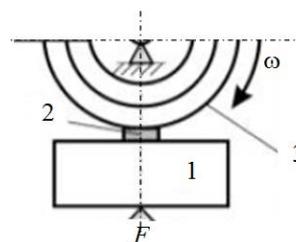


Fig. 1. Principal schematic of analyzed contact: 1 — piezo-electrical element, 2 — frictional element, 3 — rotor with coating

Duration of tribological test was 8 hours. Load F in the friction contact where 0,5 mN; 0,75 mN 1,0 mN and 1,25 mN.

Results and Disscision

The test results (friction pair ESA cermet 12C2 coating/ER) shows that during the test rotor run was 2...4 km, the reason was that rotor not rotates all the test time. The rotating speed of rotor, when it was torque loaded of 0,25 mNm, was 1,8...2,2 s⁻¹ and accelerates when normal force F increase. When $F = 1250$ mN was reached rotors speed was stabile 0,83 s⁻¹. When pezo-electric gear was loaded with brake torque of 2 mNmm rotating speed reduces. And at mormal load $F = 1250$ mN rotor stops.

In case of friction element was modified with SiO₂ the run of rotor races up to 6,2 km, though if normal load $F = 500...750$ mN and brake torque was 3...4 Nmm rotor was stopped. Under the load 500...750 mN PEA can work stabile when brake torque not 1 mNmm. In all cases of modified ER with SiO₂ PEA reach the maximal speed in seconds, but in case of pure ER rotors speed became stabile after few or more than 10 min. (surface lapping period). For successful work of PEA lapping of SiO₂ was not important

1. Kuo W.M., Chuang S.F., Nian C.Y., and Targ Y.S. Precision Nano- Alignment System using Machine Vision with Motion Controlled by Piezoelectric Motor. National Taiwan University of Science and Technology. Mechatronics. — 2008, 18.
2. Wang Z.L. Progress in Piezotronics and Piezo-Phototronics // Advanced Materials. — 2012, 1—15

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА НА ТРИБОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ ДЛЯ УЗЛОВ СТАЦИОНАРНОГО ТРЕНИЯ

С.Н. Бухаров, В.К. Меринов, А.Н. Сенатрев, В.П. Сергиенко

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; sergienko_vp@mail.ru

Введение. Нежелательный шум и вибрация, связанные с процессами диссипации и передачи механической энергии в машинах, представляют собой важную экономическую и техническую проблему в промышленности. Повышенные уровни вибраций и шума существенно снижают надежность и долговечность машин и являются, по сути, параметрами их качества [1]. В связи с этим поиск новых подходов и способов изменения структуры и свойств композиционных материалов является актуальной, практически важной задачей материаловедения. В настоящей работе экспериментально исследовали влияние содержания оксида железа на триботехнические и акустические характеристики высоконаполненных фрикционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) для узлов стационарного трения технологических машин, применяемых при производстве металлокорда.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования выбраны композиционные материалы, изготавливаемые на основе ПТФЭ (ГОСТ 10007–80), наполненного различными волокнистыми и дисперсными наполнителями, в том числе порошками бронзы БПП-1 (ТУ 48-21-150-72), оксида железа Fe_2O_3 (ГОСТ 4173–66) и базальтового волокна диаметром 1—3 мкм (ТУ 02974686.207-99). Содержание исследуемого дисперсного наполнителя (оксида железа) варьировалось в пределах 0...2,4 мас.%. Тестируемые образцы изготавливали методом прессования с их последующей термической и механической обработкой. Прессование осуществляли при давлении 100 МПа, термообработку проводили по заданному режиму: скорость подъема температуры 1 °С/мин, выдержка при $T = 390$ °С в течение 90 мин, охлаждение до комнатной температуры при отключении печи. Триботехнические исследования проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал — частичный вкладыш» при стационарных режимах трения. Давление в узле трения варьировалось в диапазоне 1,0—4,0 МПа при постоянной линейной скорости скольжения 1,0 м/с. Материал контртела — сталь марки ст. 45 с твердостью до 50 HRC. Исходная шероховатость поверхности трения $R_c = 0,52$ мкм. Испытания проводили при температуре окружающего воздуха 295 ± 2 К в условиях трения без смазочного материала. Динамические механические характеристики материалов в зависимости от времени, температуры или частоты при различных осциллирующих нагрузках исследовали

методом нерезонансного динамического механического анализа с помощью анализатора TA Instruments DMA-Q800. Для измерения параметров вибрации и акустического излучения при стационарном трении применяли 1/4" униполярный измерительный микрофон 4961 (Brüel & Kjær) и бесконтактный лазерный доплеровского виброметра VH-1000D (Ometron) с применением цифровой обработки сигналов методами спектрального и когерентного анализа.

Результаты и обсуждение. Установлено, что оптимальные триботехнические и виброакустические показатели фрикционных композитов достигаются в диапазоне малых концентраций оксида железа (0,6—1,2 мас.%). Нижний предел указанного диапазона определяется триботехническими (при меньшем содержании оксида железа повышается время приработки и выхода на стационарный режим), а верхний — виброакустическими показателями пары трения (при содержании Fe_2O_3 более 2,4% существенно возрастает уровень высокочастотной акустической эмиссии со смещением частоты основного излучения из области 16—20 кГц в область большего слухового восприятия 10—12 кГц). На рис. 1 представлены спектры шума в узле трения для фрикционных композитов, не содержащих Fe_2O_3 и наполненного оксидом железа до 2,4 мас.%.

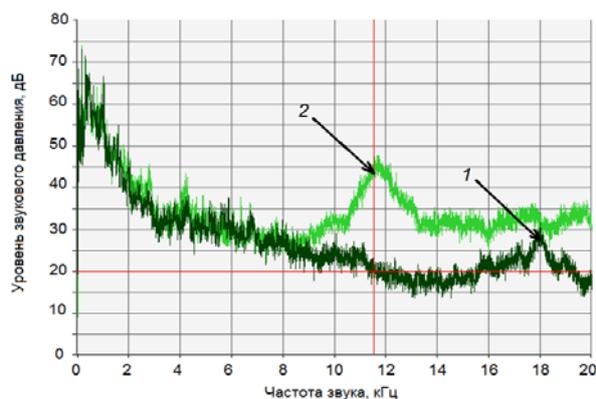


Рис. 1. Спектры шума в узле трения для фрикционных композитов без содержания Fe_2O_3 (1) и содержащего 2,4 мас.% оксида железа (2)

1. Sergienko V.P., Bukharov S.N. Noise and Vibration in Friction Systems. — Switzerland: Springer. — 2015.

СИНТЕЗ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

О.П. Паренаго, Э.Ю. Оганесова, А.С. Лядов, Т.А. Займовская, Е.Ю. Бордубанова

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия; parenago@ips.ac.ru

В докладе суммированы результаты цикла исследований по синтезу наноразмерных частиц сульфидов молибдена, вольфрама, рения и по их антифрикционной и противоизносной активности в составе смазочных масел минерального и синтетического происхождения. Синтез наночастиц протекал в две стадии. На первой стадии в случае молибдена и вольфрама проводили взаимодействие тиометаллата аммония с тетраалкиламмоний галогенидами с получением тетраалкиламмоний тиометаллатов, $(R_4N)_2MeS_4$, в которых в качестве алкильных групп были CH_3 , C_4H_9 , C_8H_{17} , $C_{16}H_{33}$, $C_{18}H_{37}$. Серосодержащее производное рения $(R_4N)ReS_4$ получали реакцией перрената аммония, тетраалкиламмоний галогенида и сульфида аммония. На второй стадии синтезированные тетраалкиламмоний тиометаллаты в качестве прекурсоров наночастиц подвергали термосольволизу, т.е. нагреванию в среде подходящего растворителя, обычно, диметилформамида. Для обеспечения растворимости частиц сульфидов металлов в углеводородных средах и предотвращения их агломерации в ходе термосольволиза в реакционную смесь вводили модификаторы поверхности частиц, как правило, алкенилсукцинимид.

Размер полученных частиц MoS_3 , WS_3 и Re_2S_7 , охарактеризованный методами малоуглового рентгеновского рассеяния и динамического светорассеяния, в заметной степени определялся природой металла, а для молибдена и вольфрама зависел также от величины алкильных групп в составе молекулы прекурсора. В целом диаметр частиц лежал в пределах 10–110 нм.

Определение трибологических свойств проводили с использованием 4-х шариковой машины трения и с помощью трибометра UMT (фирмы Brukner, США), где узел трения представлял собой палец по пластине (возвратно-поступательное движение). Для наночастиц трисульфида молибдена была обнаружена высокая антифрикционная активность (таблица).

Как следует из этих данных, наибольший эф-

фект наблюдался для наночастиц, образованных из прекурсора с октильной группой. С повышением температуры коэффициент трения снижался, вероятно, в связи с удалением модификатора с поверхности наночастиц. Противоизносная активность нано- MoS_3 была невелика. В противоположность молибдену наночастицы сульфидов вольфрама или рения проявляли противоизносные свойства (рисунок), но обладали весьма низкой антифрикционной активностью.

Таблица. Коэффициенты трения для нано- MoS_3 при различных температурах

Алкильная группа в составе прекурсора	Коэффициент трения при температуре, °С		
	90	110	130
Вазелиновое масло	0,129	0,135	0,137
$(C_4H_9)_4$	0,105	0,112	0,074
$CH_3(C_8H_{17})_3$	0,118	0,120	0,048
$[(CH_3)_2(C_{18}H_{37})_2]$	0,110	0,120	0,117

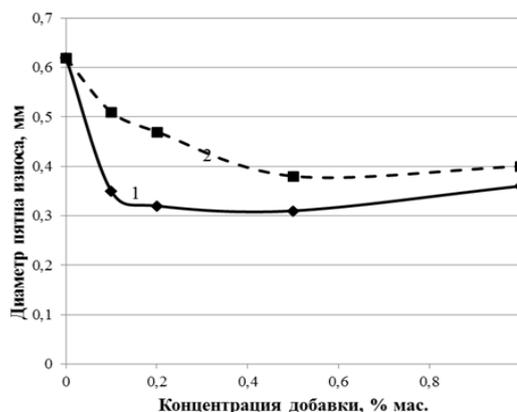


Рисунок. Зависимость диаметра пятна износа от [Re] в вазелиновом масле для частиц, полученных из: $CH_3(C_8H_{17})_3NReS_4$ (1) и $(C_4H_9)_4NReS_4$ (2)

Таким образом, в работе предложен новый класс трибологически активных добавок к смазочным маслам на основе наночастиц сульфидов металлов.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОДВЕРГНУТОГО ИОННОМУ АЗОТИРОВАНИЮ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ 40X13

А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; Grigorchik_a_n@mail.ru

Введение. Область использования метода газотермического напыления существенно ограничивается низкими трибомеханическими свойствами напыляемых покрытий. В связи с этим, для повышения трибомеханических свойств газотермических покрытий целесообразно применять методы инженерии поверхности и, в частности, методы ионного азотирования.

Материалы и методы. Исследовалось газотермическое покрытие из проволоочной стали 40X13, нанесенное методом высокоскоростной металлизации на пластины из стали 45. Скорость полета напыляемых частиц составляла 400—500 м/с, размер частиц 5—40 мкм. Толщина напыленного покрытия — 0,5—0,6 мм, а его пористость составляла ≈ 4 об. %.

Ионно-лучевое азотирование (ИЛА) покрытия осуществлялась с помощью ионного источника УВН-2М при температуре 750 К. Плотность тока ионного пучка составляла — 2 мА/см², время обработки — 3 часа. Ионно-плазменное азотирование (ИПА) покрытия проводилось в среде 25% N₂+60% Ar+15% H₂. Параметры ИПА: V = 470 В, I = 55 А, температура 780 К, время обработки — 5 часов.

Исследование фазового состояния покрытий осуществлялось на дифрактометре ДРОН-2.0 в CoK α излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Триботехнические испытания проводились по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при скорости взаимного перемещения $\approx 0,2$ м/с в смазочном материале И-20. Удельная нагрузка испытаний P составляла 50 МПа. Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор 10 кг (98 Н), 25 г (0,24 Н).

Результаты и обсуждение. Фазовый состав газотермического покрытия из мартенситной стали 40X13 в исходном состоянии включает в себя: α -(Fe,Cr), γ -(Fe,Cr) (11 об.%) и оксиды Fe₃O₄ и FeO. Твердость покрытия 600 HV 10.

В процессе ИПА при 780 К на поверхности покрытия формируется модифицированный слой глубиной ≈ 50 —60 мкм. Азотированный слой включает в себя фазы: α -(Fe,Cr), γ -(Fe,Cr)₄N, ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N, CrN, Fe₃O₄. После ИПА микротвердость покрытия возрастает до 1050 HV 0,025. Существенное возрастание микротвердости покрытия связано с выделением нитридов γ -(Fe,Cr)₄N, ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N и CrN.

В результате ИЛА покрытия из стали 40X13 при 750 К формируется модифицированный азотом слой глубиной ≈ 25 —30 мкм, включающий фазы: α -Fe, γ -(Fe,Cr)₄N, ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N, CrN, Fe₃O₄. Микротвердость покрытия после ИЛА возрастает до значения 1450 HV 0,025. Высокие значения микротвердости по-

крытия после ИЛА обусловлены выделением в нем повышенного количества высокоазотистого нитрида ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N, а также специального нитрида CrN.

Результаты триботехнических испытаний газотермического покрытия из стали 40X13 в исходном состоянии, а также после различных методов ионного азотирования представлены на рис. 1.

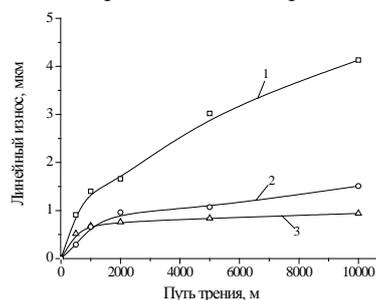


Рис. 1. Зависимость линейного износа от пути трения газотермического покрытия из стали 40X13 в смазочном материале И-20 при удельном давлении 50 МПа: 1 — исходное состояние; 2 — ИПА при 780 К (5 часов); 3 — ИЛА при 750 К (3 часа)

В исходном состоянии газотермическое покрытие из мартенситной стали 40X13 имеет интенсивность линейного изнашивания $I_n = 0,41 \cdot 10^{-9}$ (рис. 1). Износостойкость покрытия из мартенситной стали 40X13 после ИПА возрастает в 3,4 раза по сравнению с необработанным состоянием и I_n составляет $0,12 \cdot 10^{-9}$ (рис. 1). Существенное снижение интенсивности линейного изнашивания для покрытия из мартенситной стали после ИПА обусловлено выделением в покрытии легированных хромом нитридов γ -(Fe,Cr)₄N, ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N, CrN и отсутствием аустенитной фазы. ИЛА при температуре 750 К приводит к более существенному приросту износостойкости покрытия из стали 40X13 (рис. 1). Величина I_n для покрытия после ИЛА составляет $0,09 \cdot 10^{-9}$. Регистрируемое увеличение износостойкости в 4,6 раза для покрытия, подвергнутого ИЛА, обусловлено выделением в слое повышенного количества высокоазотистой фазы ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N и частиц CrN.

Заключение. Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства газотермического покрытия из мартенситной стали 40X13 в исходном состоянии и после различных видов ионного азотирования. Показано, что методы ионно-плазменного и ионно-лучевого азотирования приводят к образованию в газотермическом покрытии нитридов γ -(Fe,Cr)₄N, ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N и CrN. Установлено, что ионно-лучевое азотирование газотермического покрытия из стали 40X13 приводит к более значительному приросту его микротвердости и износостойкости по сравнению с ионно-плазменной обработкой, что связано с выделением в результате ИЛА повышенного количества нитрида ϵ -(Fe,Cr)₂₋₃N и CrN.

ТЕРМОФРИКЦИОННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТРИБОСИСТЕМАХ

А.М. Пашаев, А.Х. Джанахмедов, М.Я. Джавадов

Азербайджанская инженерная Академия, Баку, Азербайджан; ajanahmadov@gmail.com

Металлополимерные пары трения нашли широкое применение во фрикционных узлах дисково-колодочных тормозов автотранспортных средств, поэтому уделим внимание «трибостабильным» полимерам. Последние представляют собой полимеры линейного строения как ароматического, так и алифатического типа. Использование трибостабильных полимеров, даже весьма термостойких, в качестве связующих во фрикционных материалах не дали положительных результатов, т.к. возникновение подвижности макромолекул в поверхностных слоях накладок проявляется до температур их стеклования. Повышение температуры размягчения для успешного использования трибостабильных полимеров, в качестве связующих, также невозможно, т.к. полимеры приобретают чрезмерную жесткость и теряют способность к переработке через расплав. Поэтому необходимо использовать во фрикционных материалах термостойкие полимерные волокна, являющиеся по химическому строению трибостабильными полимерами и одновременно находящиеся в предельно термофрикционном стабильном состоянии. Как правило, волокна различных типов не плавятся, а температуры их размягчения находятся выше температур разложения фрикционных материалов.

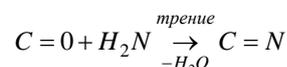
В результате многочисленных исследований фрикционных материалов с термостойкими полимерными волокнами можно сформулировать общий вывод, что с повышением скорости скольжения у всех материалов наблюдалась тенденция к повышению температуры и снижению динамического коэффициента трения. Однако химическая природа армирующих тканей оказывает существенное влияние на величину динамического коэффициента трения, особенно, в области невысоких скоростей скольжения (до 1,5 м/с), где полимерные связующие (например, резольная фенолформальдегидная смола) находятся в застеклованном состоянии. При повышении скорости скольжения и поверхностной температуры металлополимерных пар трения имеет место постепенное снижение динамического коэффициента трения. Более существенно природа волокна влияет на поверхностную температуру. Установлено, что наиболее жесткосцепные и термостойкие полимеры, из которых изготовлены ткани сверхмодульных волокон на основе термостойкого сополимера и «лола» — на основе полинафтоиленбензимидазольных волокон, приводит к более высоким значениям динамического коэффициента трения и поверхностных температур при трении армированных ими органопластов. Так, при скорости скольжения 1,60 м/с у композита на основе волокна «лола» поверхностная температура до-

стигала 300 °С, в то время как у композита с «оксалонном» — 160 °С. У последнего при $p = 0,1$ МПа и $V = 2,0$ м/с рабочая поверхность полимерной накладки при электротермомеханическом трении мало отличалась от исходной.

Достоинством тканей типа «оксалон», наряду с высокими эксплуатационными параметрами, является и ряд экономических причин. Волокна этого типа выпускаются в настоящее время по ценам более низким, чем другие типы полегетероариленовых, термостойких волокон. Это обстоятельство позволило в последние годы начать широкое внедрение композитов «оксалон» в тяжелонагруженных узлах трения тормозных устройств.

«Трибохимические активные» полимеры имеют фрикционную нестабильность из-за группы процессов, связанную с возможностью осуществления реакцией синтеза на границе раздела с металлическим фрикционным элементом. Если рассматривать трибосинтез как типичную механохимическую реакцию, то необходимо иметь как минимум две функциональных группы различного типа в полимерных цепях при электротермомеханическом трении. В этой связи интересно уделить внимание линейному полигетероарилону — полифенилхиноксалину и сополимеров на его основе.

Концевыми группами полифенилхиноксалина являются электродонорные — NH_2 группы. Электротермомеханическое трение указанного полимера характеризует его как термофрикционно стабильный полимер. Введение в макромолекулу полифенилхиноксалина электроакцепторных карбональных групп приводит к резкому возрастанию фрикционной активности уже при комнатных температурах, причем нестабильность возрастет при увеличении количества $C = O$ групп.



С точки зрения трибохимии под влиянием температуры происходит самоорганизующий процесс формирования новых азометиновых связей (см. выше реакцию), в результате которого на рабочей поверхности полимерной накладки образуется термически более сильная структура, повышающая свою устойчивость при возрастании температуры трения.

1. Разрушение твердых полимеров / Под. ред. Б. Роузена. — М.: Химия. — 1971
2. Джанахмедов А.Х., Вольченко А.И. и др. Дисковоколодочные тормозные устройства: теория, расчет и конструирование // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. — 2017 (9), № 1, 15—31

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ СПЛАВОМ

А.И. Залеснов, И.М. Букарев, В.В. Рябкова

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия; alexey_zalesnov@mail.ru

Цель — изучение износа алмазного инструмента при контактном взаимодействии с металломатричным композиционным сплавом (АКМ).

Материалы и методы. Исследования выполнены при механической обработке алюмоматричных композиционных материалов на основе АК12 наполненного высокомолекулярными частицами SiC, Al₂O₃ и В₄C.

Для механической обработки заготовок использовали проходной резец со сменными вставки из поликристаллического алмаза АСПК-2. Механическую обработку заготовок, проводили на токарно-револьверном станке с ЧПУ HAAS-SL10.

Для определения механизма износа изучали топографию изношенной поверхности инструмента с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus. Также методом масс-спектропии на установке Flash EA 1112 были изучены продукты износа в образовавшейся при точении АКМ стружке.

Для проверки адекватности предложенной аналитической модели износа алмазного инструмента при точении АКМ проведены стойкостные испытания с использованием метода планирования эксперимента. Количественно величину износа инструмента по задней поверхности измеряли на малом инструментальном микроскопе МИМ-7.

Результаты и обсуждение. Изучение топографии задней поверхности инструмента из АСПК-2, показывает наличие параллельных царапин по направлению вектора скорости резания на изношенной поверхности, что характерно для абразивно-усталостного износа. Для подтверждения выдвинутой гипотезы, были проведены исследования масс-переноса элементов инструментального материала в стружку обработанного материала.

Проанализировав данные полученные с хромотограммам стружки композиционного материала полученной при обработке АСПК-2, в навесках (стружка АКМ, упрочненного дисперсными частицами Al₂O₃, обработанной инструментом из АСПК-2) обнаружен углерод, что может свидетельствовать о присутствии в стружке материала частиц инструмента.

Анализ результатов спектрального исследования стружки АКМ обработанной инструментом из АСПК-2 показывает, что в стружке фиксируется частицы углерода массой 0,011—0,012 г и размером

частиц 0,053—0,058 мкм, которые можно идентифицировать как частицы инструментального материала.

Таким образом, износ инструмента при обработке АКМ, имеет четко выраженную абразивно-усталостную составляющую. Данное заключение можно сделать в виду того, что масса изношенной части инструментального материала синтетического алмаза находится в пределах 0,011 мг, что соответствует размеру микро чешуек, которые образуются отделением от основной части инструментального материала под воздействием абразивных частиц наполнителя. Проведенные экспериментальные исследования и полученные результаты [1—3] позволили перейти к разработке математической модели износа алмазного инструмента.

Логика построения модели включает последовательное вычисление следующих величин:

1. Мощности воздействия частиц наполнителя, расположенных по длине поперечного среза, на заднюю поверхность инструмента;
2. Объемной скорости износа материала инструмента абразивными частицами наполнителя в АКМ;
3. Объема износа инструментального материала;
4. Значения стойкости инструмента,

Сравнение расчетных и экспериментальных значений стойкости алмазного инструмента при точении АКМ, показывает, что расхождение контролируемого параметра в большинстве опытов не превышает 20%.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-38-00817 мол_а).

1. Залеснов А.И., Петухов Е.Н. Износ режущих инструментов из сверхтвердых синтетических материалов при точении алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных дисперсными частицами Al₂O₃ и SiC // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2011 (288), № 4/2, 51—55
2. Zalesnov A.I., Petukhov E.N., and Podshivalkin V.A. Endurance Tests of Diamond Tools in the Turning of Aluminum Composites Reinforced by Nano- and Microparticles // Russian Engineering Research. — 2014 (34), no. 7, 475—479
3. Петухов Е.Н., Залеснов А.И., Аборкин А.В. Исследование обрабатываемости точением дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. — 2014 (40), № 10, 14—19

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ДАРМШТАДТСКОГО РЕСУРСА

И.В. Князькина, В.В. Коврига

ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», Москва, Россия; kovriga@polyplastic.ru.

Цель

Произвести расчет дармштадтского ресурса для основных материалов труб, перспективных для использования в трубах для гидротранспортировки пульпы.

Материалы и методы

В последнее время для характеристики гидроабразивной устойчивости полиэтиленовых трубопроводов широко применяется Дармштадтский метод нормированный документом ИСО 295-3. Однако при испытании по Дармштадтскому методу многие материалы дают схожие результаты, что затрудняет выбор труб для конкретных видов применения.

Для преодоления этого недостатка разработаны рекомендации по определению дармштадтского ресурса, который выражается длиной потока гидроабразивной пульпы, который способна пропустить работающая труба без потери работоспособности. Эти характеристики определяются уже не для материала, а для конкретной трубы и могут существенно

различаться для труб, изготовленных из одного материала при изменении геометрических параметров трубы.

Дармштадтский ресурс требует специальной методики расчета в тех случаях, когда мы имеем дело с двухслойными трубами, внутренний и наружный слой которых обладает различной абразивостойкостью, а также для других видов многослойных труб.

Результаты и обсуждение

Получены данные по гидроабразивной износоустойчивости основных материалов, произведен расчет дармштадтского ресурса типовой линейки труб.

1. DIN EN 295-3:2012 Vitrified Clay Pipes and Fittings and Pipe Joints for Drains and Sewers — Part 3: Test Methods
2. Руководящие технические материалы, РТМ 48532278-001-2014, расчет дармштадтского ресурса износоустойчивости и данные по износу труб из различных видов полиэтилена, предназначенных для инженерных сетей, Часть 1. — Группа «ПОЛИМЕРТЕПЛО». — 2014

ИЗУЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ГРАНУЛ ИЗ МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СПЛАВА АМg₂, СОДЕРЖАЩЕГО НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ГРАФИТ

А.В. Аборкин, А.В. Шакиров

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия; aborkin@vlsu.ru

Цель — получение и изучение коэффициента трения объемных композиционных гранул на основе сплава АМg₂, содержащего нанокристаллический графит.

Материалы и методы. Исходная шихта представляла собой смесь гранул глобулярной формы диаметром 1...2 мм из алюминиевого сплава АМg₂ с добавлением 1% вес. порошка графита фирмы Astos Organics с размером частиц менее 20 мкм. Механический синтез исходной шихты был проведен в шаровой планетарной мельнице АГО-2У с применением поверхностно активных веществ (стеариновая кислота, 1% вес.) в атмосфере аргона [1]. Изучение структурно-фазового состава объемных композиционных гранул проводили методами рентгеноструктурного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света и просвечивающей электронной микроскопии. Микротвердость гранул измеряли методом Виккерса. Коэффициент трения скольжения f определялся на воздухе в условиях контактного взаимодействия объемных гранул и диска из термообработанной до твердости 55 HRC стали 4X5MФС с помощью трибометра. Исследование элементного состава контактирующих поверхностей проводили с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения.

Результаты и обсуждение. Объемные гранулы, полученные при 660 об/мин имеют округлую форму и размер в диапазоне 1—3 мм. Согласно данным рентгеноструктурного анализа фазовый состав объемных гранул аналогичен исходному матричному сплаву АМg₂. Уширение пиков алюминия и смещение в сторону меньших углов объясняется процессами наноструктурирования и изменением параметра решетки ввиду увеличения концентрации легирующих элементов в твердом растворе алюминия. Снижение интенсивности пиков интерметаллидной фазы, также свидетельствует о деструкции интерметаллидов Al₃Mg₂, что в свою очередь ведет к увеличению концентрации магния в твердом растворе алюминия. На спектре комбинационного рассеяния света можно отметить значительное снижение интенсивности, ярко выраженной в исходном графите линии 2D, а также изменение положения, полуширины и интенсивности линий D и G. На ПЭМ-изображениях высокого разрешения между субзернами твердого раствора алюминия, а также на стыках нескольких субзерен можно наблюдать участки, соответствующие графиту размером менее 5 нм с сильно искривленными слоями. Это подтвер-

ждает, что в процессе механического синтеза происходит механическое расщепление исходного графита. Полученные гранулы имеют высокую микротвердость 1,96 ГПа в 4 раза, превосходящую твердость литого сплава [2]. Коэффициент трения изменяется в диапазоне 0,4—0,65, что на 4—15% ниже значений коэффициента трения матричного материала, полученных при тех же условиях. Поверхности износа тела из стали представляли собой контактные участки, ориентированные по направлению скольжения. Износ в данном случае характеризовался контактным и пластическим разрушением точек фрикционной сварки с налипанием и размазыванием материала гранулы по поверхности стали. Разрушение поверхности происходит путем отделения частиц размягченного материала контртела и налипания их на более твердую поверхность тела из стали, что характерно для контакта алюминия с твердой поверхностью [3]. Также можно отметить микроцарапины на поверхности трения, что свидетельствует о протекании процессов микрорезания в зоне контакта. Анализ изменения элементного состава дорожек трения на поверхности тела из стали показывает увеличение процентного содержания алюминия, магния и кислорода. Значительное увеличение содержания алюминия на поверхности трения покрытий свидетельствует о его переносе с контртела, что характерно при адгезионном износе. Кроме того, отмеченное увеличение кислорода на контактной поверхности покрытий позволяет говорить об образовании в зоне трения оксида алюминия, представляющего собой абразивные частицы. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об адгезионно-абразивном механизме износа контактной пары.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-08032 А).

1. Aborkin A.V., Evdokimov I.A., Vaganov V.E., Alymov M.I., Abramov D.V., Khor'kov K.S. Influence of Mechanical Activation Mode on Morphology and Phase Composition of Al-2Mg-nC Nanostructured Composite Material // *Nanotechnologies in Russia*. — 2016 (11), nos. 5—6, 297—304
2. Аборкин А.В., Бабин Д.М., Захаров А.А. Влияние числа проходов при равноканальном угловом прессовании на эксплуатационные свойства алюминиевого сплава // *Материаловедение*. — 2013, № 11, 33—38
3. Aborkin A.V., Ryabkova V.V., Abramov D.V. Friction and Wear of Nitride and Carbide Coatings in Contact with Aluminum // *Journal of Friction and Wear*. — 2013 (34), no. 4, 294—301

ФОРМИРОВАНИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА – БЛОДЖЕТТ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТЫ С ДИСУЛЬФИДОМ МОЛИБДЕНА И АМОРФНЫМ УГЛЕРОДОМ

А.Е. Соломянский, В.Е. Агабеков

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; solasy@mail.ru

Введение. Композиционные пленки Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) высших жирных кислот с частицами дисульфида молибдена или аморфного углерода, формирование которых не требует вакуумирования и высоких температур, представляют интерес для создания защитных и твердосмазочных покрытий в прецизионных узлах трения [1, 2].

Цель работы — формирование защитных покрытий для прецизионных узлов трения на основе композиционных чередующихся монослоев ЛБ стеариновой кислоты (СК) с частицами дисульфида молибдена (MoS_2) и аморфного углерода (С).

Материалы и методы

Покрытие СК– MoS_2 /СК–С создавали на установке LT-201 с помощью «рулонных» технологий [3]. Ленгмюровские слои СК– MoS_2 (средний размер частиц $\text{MoS}_2 \sim 600$ нм) и СК–С (средний размер частиц С ~ 400 нм) формировали из суспензий MoS_2 или С и СК в хлороформе с массовым соотношением компонентов 1,0:1,0 и переносили их на кремниевую подложку, закрепленную на вращающемся цилиндре (ВЦ), разделяющем ванну ЛБ на два отсека за счет его вращения и сжатия слоев СК– MoS_2 и СК–С линейными барьерами при поверхностном давлении $\sim 30,0 \pm 1,0$ мН/м. Количество оборотов ВЦ: 1 при скорости его вращения 0,1 оборота в минуту. Направление движения ВЦ — против часовой стрелки. Бислой СК– MoS_2 /СК–С формируется на кремнии за 1 оборот ВЦ [3]. Триботехнические испытания образцов осуществляли на трибометре возвратно-поступательного типа (ИММС НАН Беларуси). Условия тестирования: приложенная нагрузка 0,5 Н, индентор — стальной шарик диаметром 3,0 мм (сталь 95Х18), длина хода индентора 3,0 мм, его линейная скорость 4,0 мм/с. Граничным условием проведения эксперимента являлось значение коэффициента трения $\sim 0,4$ [1].

Результаты и обсуждение

О переносе частиц MoS_2 и С на кремний из обоих отсеков при формировании бислоя ЛБ свидетельствует изменение поверхностных давлений в отсеках (рис. 1), которое обусловлено, с одной стороны, их расхождением за счет переноса на подложку, а, с другой, поддержанием поверхностного давления постоянным $\sim 30,0 \pm 1,0$ мН/м при сжатии ленгмюровских слоев СК– MoS_2 и СК–С линейными барьерами. При нагрузке 0,5 Н немодифицированная кремниевая подложка изнашивается после пер-

вого цикла скольжения (рис. 2, кривая 1), а монослой СК и покрытие СК– MoS_2 /СК–С разрушаются после ~ 415 и 1790 циклов соответственно (рис. 2). При этом частицы MoS_2 , С и их агрегаты остаются в зоне контакта поверхностей и предохраняют их от разрушения [1].

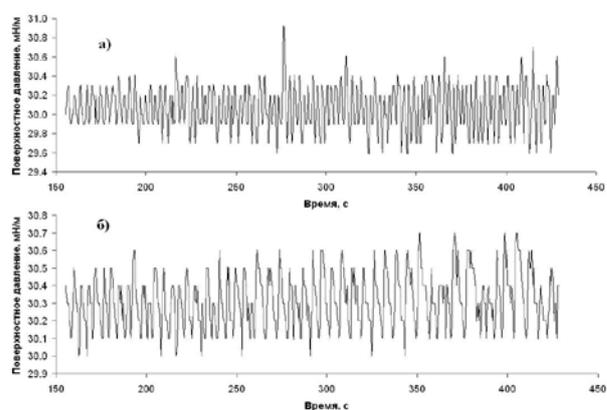


Рис. 1. Изменение поверхностных давлений в процессе переноса ленгмюровских слоев СК– MoS_2 и СК–С, на кремниевые подложки из отсека А (а) и Б (б) при формировании бислоя СК– MoS_2 /СК–С

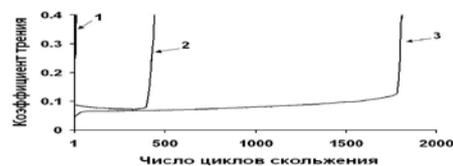


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения: 1 — немодифицированная кремниевая поверхность, 2 — монослой СК [1], 3 — бислой СК– MoS_2 /СК–С

Выводы

Показана возможность получения бислоя ЛБ за счет синхронного выделения на кремниевую подложку чередующихся монослоев стеариновой кислоты с дисульфидом молибдена и аморфным углеродом. Разработанный способ формирования мультислойных пленок ЛБ может быть использован для создания защитных и смазочных покрытий в прецизионных узлах трения.

1. Соломянский А.Е., Жавнерко Г.К., Агабеков В.Е. // Журнал прикладной химии. — 2012 (85), 1539–1544
2. Hao J. Self-Assembled Structures Properties and Applications in Solution and on Surfaces. — London: CRC Press. — 2010
3. Патент РБ 15411 Жавнерко Г.К., Агабеков В.Е. Соломянский А.Е., Чижик С.А. и др. Устройство для получения на твердой поверхности моно- или мультислойных пленок амфифильных соединений. опубл.: 28.02.2012

ВЛИЯНИЕ МЕЗОМОРФИЗМА НА СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

К.С. Бурченков¹, В.В. Новиков¹, Светлана А. Сырбу¹, Р.Ю. Лисицын², М.С. Маршалов²

¹Ивановский государственный университет, Иваново, Россия; novikov-ww@mail.ru

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия

Введение. Эфиры холестерина являются термотропными жидкокристаллическими наноматериалами и способны образовывать мезофазу в определенном интервале температур. Известно, что их использование в качестве присадок к смазочным материалам позволяет улучшать смазочную способность масел за счет структурного упорядочения их в граничном смазочном слое на трущихся поверхностях в узлах трения машин и при механической обработке материалов [1—2].

Цель работы — изучение влияния мезоморфных превращений в эфирах холестерина на смазочные свойства этих веществ при граничном трении. Нами исследованы трибологические свойства эфиров холестерина муравьиной, валериановой, каприловой, каприновой, ундециловой, тридекановой, пентадекановой, *n*-(нонилокси) бензойной, *n*-(додецилокси) бензойной кислот, чистого холестерина и холестерина хлористого. Ряд исследуемых веществ обладают свойством мезоморфизма и образует в определенном температурном интервале холестерическую ЖК-фазу. Ряд веществ не обладают мезоморфизмом и после плавления образуют только изотропную жидкость. Интересно было сравнить их свойства при трении.

Материалы и методы. Испытания на трение проводились на разработанном нами лабораторном трибометре ТЛПТ-01 в условиях граничного трения при возвратно-поступательном движении. Описание устройства и принципа работы устройства приведены в работе [3]. Трибометр использует начальную схему контакта плоскость—сфера. Сферой служил шарик ШХ15 диаметром 4,9 мм. Материал пластины — закаленная и отпущенная сталь Р6М5.

Общим подготовительным этапом при всех испытаниях было следующее. С целью удаления загрязнений узел трения предварительно разбирали, трущиеся детали погружали в растворитель на 20 минут, вынимали, протирали и высушивали. После этого собирали узел трения и производили притирку в сухую при скорости скольжения $v = 0,2$ см/с, длине пути 4 мм и нагрузке 30 Н в течение 250 циклов возвратно-поступательного движения. В результате притирки насухо перед испытанием в зоне трения возникает мало изменяющееся во времени пятно износа диаметром 0,7...0,9 мм. Давление на таком контакте при нагрузке в 30 Н составляет 50...80 МПа. Коэффициент трения всухую после притирки достигал значений $\mu = 0,6...0,7$.

После притирки насухо без выключения изме-

рения на режиме притирки исследуемый наноматериал в виде порошка помещался вблизи зоны трения и включали медленный нагрев ячейки со скоростью 0,1 град/с. При достижении температуры плавления исследуемое вещество расплавилось и смазывало зону контакта, растекаясь по ней.

Результаты и обсуждение. В результате исследований было установлено, что при трении жидкокристаллических наноматериалов в диапазоне температуры, соответствующих существованию мезофазы коэффициент трения снижается (рис. 1). Этого не наблюдается для веществ, которые не обладают мезоморфизмом.

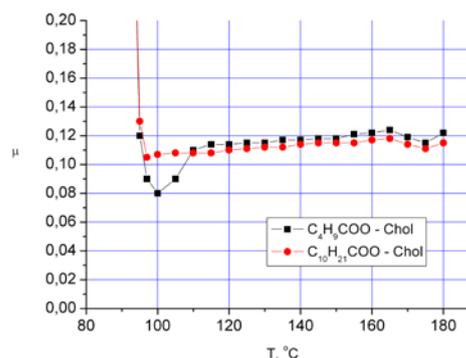


Рис. 1. Влияние температуры на коэффициент трения для жидкокристаллических наноматериалов

Установлено, что наилучшими смазочными свойствами обладает холестерилловый эфир *n*-(додецилокси) бензойной кислоты. Он имеет широкий диапазон существования мезоморфной фазы 127...195 °С и обеспечивает наиболее низкий коэффициент трения $\mu = 0,06...0,08$.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-43-03125 р_центр_a.

- Ермаков С. Ф., Роденков В.Г., Белоенко Е.Д., Купчинов Б.И. Жидкие кристаллы в технике и медицине. — Мн.: ООО «Асар», М.: ООО «ЧеРо». — 2002
- Novikov V.V., Latyshev V.N., Syrbu S.A., Nuzdina E.E., and Marshalov M.S. Principles of Optimizing Additive Compositions to Mesogenic Compounds of Metal Working LCA // Journal of Friction and Wear. — 2014 (35), no. 2, 123—128
- Новиков В.В., Лисицын Р.Ю., Бурченков К.С., Афанасьева О.В., Сырбу С.А. Трибометр лабораторный поступательный термостабилизированный // Трибология — машиностроению: Труды XI междунар. науч.-техн. конф. — М. — 2016, 144—146

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЗОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СТЕКЛА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

В.В. Новиков, Светлана А. Сырбу, А.Г. Наумов

Ивановский государственный университет, Иваново, Россия; novikov-ww@mail.ru

Введение. Основной операцией холодной механической обработки изделий из стекла является шлифование. При воздействии абразивных зерен на поверхность стекла возникают трещины. При последующем прокатывании зерен удаляются осколки, отделенные трещинами от основной массы стекла. В работах академика А. П. Ребиндера [1] доказано, что применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) в процессе шлифования хрупких твердых тел может существенно ускорить процесс шлифования. Проникая в систему поверхностных микротрещин, поверхностно-активная жидкость препятствует обратному смыканию трещин после снятия нагрузки.

Цель работы — разработка теоретического описания кинетики формирования и разрушения смазочной пленки ПАВ при абразивной обработке стекла для расчета оптимального содержания ПАВ в СОЖ.

Теоретическая модель. За основу решения взята ранее разработанная модель формирования смазочного слоя в зоне упруго-пластического контакта при лезвийной обработке металлов [2]. Нами была получена формула, позволяющая рассчитать оптимальную концентрацию ПАВ в жидкости, при которой возможно формирование монослоя ПАВ на ювенильной поверхности материала за период между прохождением по ней микровыступов инструмента

$$C_{opt} = \frac{a_m}{2} \sqrt{\frac{v}{D_a \cdot l_R}}, \quad (1)$$

где D_a — коэффициент диффузии, v — скорость резания, l_R — расстояние между пятнами воздействия выступов на поверхность.

Поскольку процесс абразивной обработки стекла — это процесс периодического воздействия на участок поверхности абразивных зерен и его разрушения, то эффективное действие СОЖ с содержанием ПАВ будет при таких условиях, при которых новая поверхность будет успевать покрываться монослоем молекул ПАВ в период между прохождением зерен.

Расстояние между точками воздействия на материал можно определить как

$$l_R = \frac{1}{N_g d_g} = \sqrt{\frac{HV}{p \cdot N_g}}, \quad (2)$$

где d_g — диаметр пятна контакта, N_g — поверхностная плотность абразивных зерен, HV — твердость материала, p — среднее давление на контакте абразивный инструмент — поверхность стекла.

Коэффициент диффузии можно вычислить по формуле Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{6\pi r_m \eta_j}, \quad (3)$$

где r_m — радиус молекулы, η_j — динамическая вязкость растворителя.

Таким образом, все параметры, входящие в формулу (1) определены режимом обработки, видом абразивного инструмента и свойствами СОЖ.

Проверка адекватности модели. Для установления оптимальной концентрации ПАВ в СОЖ нами был проведен эксперимент по шлифованию стекла в растворах ПАВ различной концентрации. Химический состав обрабатываемого стекла: SiO_2 — 67...64%, PbO — 18...24%, K_2O — 13...17%, микротвердость 4500 МПа. Обработка производилась алмазным инструментом А1ПВ (зернистость абразива 250...200 мкм) при давлении на контакте $p = 1$ МПа и скорости шлифования 10 м/с. Установлено, что оптимальная концентрация присадки, обеспечивающая максимальный съём материала соответствует значениям концентрации $C_{opt} \approx 0,0007...0,0015$ мас. %.

Теоретический расчет при указанных параметрах дает следующие значения контактного взаимодействия: $d_g \approx 3$ мкм, расстояние между пятнами последовательного воздействия на поверхность $l_R \approx 16$ мм. Если принять типичный размер молекул ПАВ $a_m \approx 0,5$ нм. и температуру жидкости 330 К и вязкость $\eta_j = 0,41$ мПа·с коэффициент диффузии молекулы будет равен $D_a = 2,3 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Подставляя условия в формулу (1) получаем $C_{opt} \approx 1,25 \cdot 10^{-3}$. Очевидно, что теоретический расчет дает хорошее совпадение с экспериментальными результатами, а построенная модель адекватна.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-43-03125 p_центр_a.

1. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах деформации и разрушения // Успехи физических наук. — 1972 (108), вып. 1, Сентябрь, 2—41
2. Новиков В.В., Сырбу С.А. Кинетика формирования граничного смазочного слоя в зоне контакта стружка-инструмент при резании металлов // Трение и износ. — 2016 (37), № 3. 318—328

Триботехнические особенности экологически чистых смазочных материалов на основе растительных масел

С.Ф. Ермаков¹, Т.Г. Чмыхова¹, А.Л. Богданов¹, А.В. Тимошенко²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; erm-s@yandex.ru)

²Локомотивное депо, Гомель, Беларусь

Введение. Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что на современном этапе все более актуальным является создание новых экологически чистых методов и средств, необходимых для реализации низкого трения и износа твердых тел. Особенно это касается создания специальных экологически чистых смазочных составов, позволяющих эффективно работать при высоких механических нагрузках в течение длительного времени и управлять фрикционным взаимодействием твердых тел, или другими словами изменять их триботехнические характеристики в нужном направлении. Не исключением являются процессы трения пары «колесо—рельс».

Цель — исследование возможности улучшения триботехнических характеристик растительных масел и разработка на их основе эффективных смазочных материалов для узлов трения машин, механизмов и транспортных систем.

Материалы и методы. В качестве объектов исследований выбраны образцы смазочных материалов (СМ) на основе рапсового и подсолнечного масел (соответственно, РМ и ПМ) без добавок и с добавками соединений холестерина (СХ) и комплексных загустителей (КЗ), синтезированные в лабораторных условиях. Полученные образцы сравнивались с серийно выпускаемыми минеральными маслами (ММ): И-20А, И-40А и СМ на их основе («АКС РЕЛЬСОЛ», «АКС АГС» и др.), широко используемыми в настоящее время на железнодорожном транспорте для рельсо- и гребнесмазывания. Технологические режимы получения СМ на основе растительных масел моделировались на лабораторной реакторной системе ИКА LR2.ST, модифицированной для получения комплексных пластичных СМ. Жирнокислотный состав растительных масел определяли на газовом хроматографе. Противозносные свойства исследуемых СМ оценивали на ЧШМ в соответствии с ГОСТ 9490–75, а также в зависимости от времени испытаний при нагрузке 392 Н по специально разработанной методике с использованием разработанных нами метода и алгоритмов для прецизионных измерений пятен износа. Испытания исследуемых СМ также проводили на компьютеризированной установке трения СМТ-1 при фрикционном взаимодействии роликов из колёсной и рельсовой сталей при скорости скольжения 0,5 м/с и нагрузке 1627 Н. Состояние поверхностей трения исследовали на оптическом микроскопе «NU-2».

Результаты и обсуждение. Установлено, что в исследуемых растительных маслах наибольшее со-

держание приходится на непредельные жирные кислоты: олеиновую, линолеовую и линоленовую. Последние, как известно, являются великолепными природными ПАВ, благоприятными для снижения трения и износа твердых тел. Подтверждением этого являются результаты, представленные на рис. 1, согласно которым СМ на основе РМ(3) в сравнении с ММ(1) без добавок присадок имеют более высокие триботехнические характеристики. При этом отмечено, что с ростом времени испытаний на ЧШМ диаметры пятен износа монотонно увеличиваются в обоих случаях. Показано, что добавки СХ (кривые 2 и 4) заметно улучшают экранирующее действие этих СМ. Однако более эффективное защитное и смазочное действие обеспечивают СМ как на минеральной (5,6), так и на растительной основе и КЗ (7).

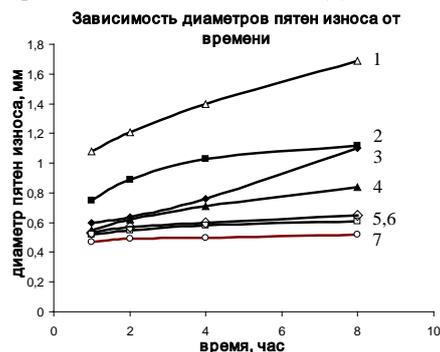


Рис. 1. Триботехнические характеристики СМ в зависимости от времени испытаний на ЧШМ: 1 — И-20А; 2 — И-20А+3 мас.% СХ; 3 — нерафинированное РМ; 4 — нерафинированное РМ+3 мас.% СХ; 5 — АКС РЕЛЬСОЛ; 6 — АКС АГС; 7 — СМ на основе РМ и КЗ

Последнее подтверждено при модельных испытаниях на СМТ-1 (табл. 1) при фрикционном взаимодействии роликов из колёсной и рельсовой сталей.

Таблица 1. Результаты испытаний СМ на СМТ-1

Смазочные материалы (СМ)	Износ роликов за 12 ч, г		Коэффициент трения	Температура в зоне трения, °С
	колесного	рельсового		
СМ на основе РМ и КЗ	0,0067	0,0030	0,077	63
АКС-АГС	0,0160	0,0057	0,09—0,1	70

При этом отмечено, что СМ на РМ и КЗ в сравнении с традиционными СМ, например, «АКС АГС» имеют не только более высокие триботехнические характеристики, но явно выделяются среди них своими экологическими свойствами.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ-ОРИЕНТАНТА НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ХАРАКТЕРНЫХ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

И.А. Буяновский¹, А.Н. Большаков¹, В.А. Левченко²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия, buyan37@mail.ru

²Химический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

Введение. Исследуются антифрикционные свойства инактивного масла ПАО-4 и этого же масла с присадками ПАВ и дитиофосфатом цинка при трении стальных и керамических шаров по стали с нанокристаллическим покрытием-ориентантом как нелегированным, так и легированным W или Mo соответственно. Установлено, что как покрытие-ориентант, так и введение в масло ПАВ практически одинаково снижают трение стали, причём эти эффекты не суммируются. Легирование покрытия как вольфрамом, так и молибденом в серосодержащей среде заметно повышает антифрикционные свойства смазочной композиции.

В обзоре [1] показано, что легирование углеродных алмазоподобных покрытий деталей смазанных узлов трения различными элементами оказывает заметное влияние на антифрикционные свойства этих трибосопрежений.

Цель работы — установить, какое влияние оказывает легирование такими элементами, как вольфрам и молибден, на антифрикционные и противоизносные характеристики углеродного покрытия-ориентанта, предложенного ранее [2]. В работе Подгорника и др. [3] для аморфного углеродного покрытия, легированного вольфрамом, наблюдалось заметное снижение коэффициента трения при изнашивании в серосодержащей среде.

Материалы и методы. Трибологические исследования проводили на машине трения КТ-2, снабжённой специальной оправкой для реализации схемы трения «шарик—три ролика». Зажатый во вращающемся шпинделе стальной или керамический шарик под приложенной нагрузкой взаимодействует с тремя сложенными треугольником в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя, роликами, вытирая на них лунки. Для обеспечения испытания в режиме граничной смазки применена низкая частота вращения шпинделя — 1 мин⁻¹. Испытания проводятся при трёх значениях осевой нагрузки — 108 Н, 50 Н и 25 Н. Продолжительность каждого испытания — 60 мин. В качестве смазочной среды использовали полиальфаолеиновое масло ПАО-4 без присадок и с присадками: поверхностно-активной (1% олеиновой кислоты) и химически активной, серосодержащей (2% ДФ-11).

Результаты и обсуждение. Результаты испытаний представляли в виде зависимостей коэффициентов трения от продолжительности испытаний. Установлено влияние на антифрикционные свойства углеродных монокристаллических покрытий-ори-

ентантов, как легирования вольфрамом или молибденом монокристаллического углерода МКУ, так и материалом контртела (сталь ШХ-15 или керамика Si₃N₄) и составом смазочной среды. При трении стали по нелегированному МКУ-покрытиям в присутствии масла без присадок коэффициент трения заметно снижается по сравнению с трением стали по стали. Присадка олеиновой кислоты заметно снижает коэффициенты трения при трении стали как по стали, так и по нелегированному, и по легированному покрытиям. Так, при максимальной нагрузке на узел трения в среде масла ПАО-4+1% олеиновой кислоты при трении стального шара по МКУ-покрытию, как нелегированному, так и легированному соответственно вольфрамом или молибденом, коэффициент трения при максимальной нагрузке составляет 0,15—0,16 (такой же, как при трении стали по стали в этой среде, то есть антифрикционные эффекты от МКУ и поверхностно-активной среды не суммируются).

В среде масла ПАО-4 с серосодержащей присадкой ДФ-11 при трении стального шара по МКУ, легированному вольфрамом или молибденом, коэффициенты трения составляли соответственно 0,09 и 0,05, что, по-видимому, объясняется образованием в процессе трения дисульфидов вольфрама и молибдена, смазочное действие которых хорошо известно. МКУ-покрытие, легированное вольфрамом, лучше других покрытий сопротивлялось износу. В то же время, легирование МКУ-покрытия молибденом приводит к некоторому увеличению износа этого покрытия.

Для МКУ-покрытия, легированного как вольфрамом, так и молибденом, таких эффектов в серосодержащей среде ранее не наблюдалось.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 15-08-05338).

1. Буяновский И.А., Игнатъева З.В., Большаков А.Н. и др. Углеродные алмазоподобные покрытия деталей смазанных узлов трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2011, № 11, 14—26
2. Левченко В.А., Матвеев В.Н., Буяновский И.А., Игнатъева З.В. Роль углеродных покрытий-ориентантов в оптимизации смазочной способности граничных слоёв // Проблемы машиностроения и надёжность машин. — 2004, № 2, 43—48
3. Podgornik B., Hren D., Vizintin J., et al. Combination of DLC Coatings and EP Additives for Improved Tribological behavior of Boundary Lubricated Surfaces // Wear. — 2006 (261), 32—40

КООРДИНАЦИОННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДИОКСИМОЛИБДЕНА — ПЕРСПЕКТИВНАЯ ПРИСАДКА К МОТОРНЫМ МАСЛАМ

А.Г. Пономаренко¹, А.С. Бурлов¹, М.В. Бойко²,
А.Г. Галкина², Т.А. Ширяева², Т.Г. Бойко², М.В. Никогосов²

¹НИИ ФОХ Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия, invec@mail.ru

²НПК ООО «Дон-Инвек», Ростов-на-Дону, Россия

Введение. Решение задачи снижения потерь на трение в двигателях внутреннего сгорания в последнее время успешно решается введением в состав масел координационных соединений переходных металлов. Комплексы таких металлов, как медь, никель, кобальт, цинк, способны существенно (до 10 раз) снижать коэффициент трения и интенсивность износа [1]. Высокие трибологические характеристики достигаются благодаря формированию на поверхностях трения пленок сложной структуры в результате трибохимических реакций с участием компонентов масла. Низкий коэффициент трения обеспечивает трибополимерная пленка, образовавшаяся из сложного эфира с участием координационного соединения.

Цель — исследование трибологических свойств композиций на основе моторного масла, процессов формирования смазочных слоев, влияния присадки на характеристики двигателя внутреннего сгорания.

Материалы и методы. Моторное масло, комплекс диоксимолибдена (VI) с бензоилгидразоном 2-гидрокси-1-нафталяльдегида (комплекс молибдена), сложные эфиры монокарбоновых, дикарбоновых и оксикарбоновых кислот. Для исследования поверхности использовали методы оптической и растровой электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии НПВО, рентгенофлуоресцентного анализа. Испытания проводили на машине торцевого трения типа АЕ-5 и на стенде с одноцилиндровым двигателем внутреннего сгорания.

Результаты и обсуждение. Испытания композиций с вазелиновым маслом на машине торцевого трения показали, что комплекс молибдена улучшает антифрикционные и нагрузочные характеристики на уровне и даже в большей степени, чем комплексы других переходных металлов. Строение сложных эфиров в меньшей степени влияет на параметры трения.

Исследования поверхностей трения показывают, что строение трибополимерных пленок аналогично пленкам, полученным в присутствии комплексов меди, никеля, кобальта, цинка [1]. Метод ИКС НПВО показал наличие фрагментов сложных

эфиров в составе пленок подобно исследованным для композиций с другими переходными металлами. Методом рентгенофлуоресцентного анализа доказано наличие молибдена в пленках на поверхностях трения.

Полученные результаты свидетельствуют о едином механизме формирования трибополимерных пленок с участием координационных соединений переходных металлов и сложных эфиров карбоновых кислот, который предложен в работах [1, 2].

Нагрузочные характеристики композиций зависят от адгезионной и когезионной прочности трибополимерной пленки. Координационные соединения повышают оба эти параметра. Наибольшее значение наблюдается для композиций с комплексом молибдена.

Подобран оптимальный состав композиции присадок, содержащий комплекс молибдена и сложные эфиры — КОМОЛ, с моторным маслом SAE10W40 и проведены испытания на стенде с одноцилиндровым двигателем внутреннего сгорания. По результатам испытаний мощность двигателя возросла на 7—10%, а расход топлива снизился на 8—12%.

Факт уменьшения расхода топлива подтверждается изменением температуры выхлопных газов, которая снижается на 10—15 °С.

Полученные результаты способствуют разработке энергосберегающих моторных масел для экономичных двигателей внутреннего сгорания.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Проект ФЦП № 14.575.21.0095, уникальный идентификационный номер Соглашения RFMEF157514X0095).

1. A.G. Ponomarenko, Burlov A.S., Boiko M.V., Shiryayeva T.A., Kalmykova A.G., Zaichenko S.B., and Milutka M.S. Investigation of Tribochemical Processes in Lubricating Compositions that Contain Coordination Compounds of Transition Metals // *Journal of Friction and Wear.* — 2015 (36), no. 1, 15—22
2. Ponomarenko A.G., Boiko M.V., Kalmykova A.G., Boiko T.G., Shiryayeva T.A., and Burlov A.S. Tribochemical Processes in Engine Oil with Copper Nanoparticles and Azomethine Ligand // *Journal of Friction and Wear.* — 2016 (37), no. 5, 435—440

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ТРАКТОРОВ МИНСКОГО ТРАКТОРНОГО ЗАВОДА

А.А. Дмитриевич, А.Н. Роговой, А.В. Лешок

¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь, nil-12@inbox.ru

В Институте порошковой металлургии разработан и внедрен в серийное производство спеченный порошковый материал на основе меди ФМ-12 для эксплуатации в условиях смазки в узлы трения тракторов «Беларус». Узлами трения, использующими фрикционные диски являются: 1) муфта привода переднего ведущего моста трактора «Беларус» 250—350 л.с. (диск фрикционный 2522-1802035-01); 2) муфта привода переднего ведущего моста трактора МТЗ-100 (диск фрикционный 86-1802035А-01); 3) тормоз трактора «Беларус» 2022 (диск фрикционный 2022-3502015-А).

Спеченный порошковый фрикционный материал ФМ-12 представляет собой оловянистую бронзу с добавкой титана. Триботехнические характеристики материала при удельной нагрузке — $4 \pm 0,2$ МПа и скорости скольжения — 10 ± 1 м/с следующие: коэффициент трения динамический — 0,07—0,12; интенсивность износа — 2—4 мкм/км; коэффициент теплопроводности — 28—34 Вт/(м·°К).

Разработанный материал ФМ-12 обладает более высоким значением коэффициента трения и меньшим значением пика момента трения по сравнению с известным материалом на основе меди (МК-5). Результаты изменения работы (А) и мощности (N) трения приведены на рис. 1.

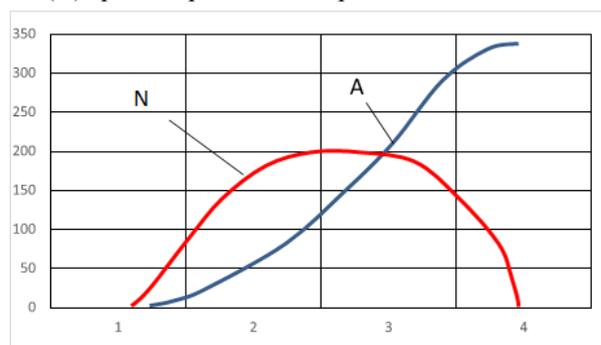


Рис. 1. Результаты изменения работы (N) и мощности трения (A) при испытаниях спеченного порошкового материала ФМ-12 в муфте привода трактора МТЗ-100

Работа трения, поглощаемая тормозом за одно торможение при ресурсных испытаниях, составляла 200—226 кДж, а при проверке эффективности в режиме торможения нагруженного трактора

300—316 кДж. Пиковое значение тормозного момента при ресурсных испытаниях достигала 4250 Н·м, а при проверке эффективности 4910 Н·м. Максимальная частота вращения вала тормоза составляла 983—992 об/мин. Тормоз обеспечивал требуемую эффективность: время торможения при нормальном усилии $2P = 600$ Н составило 2,5 с (требуемое значение по методике не более 3,5 с).

На сегодняшний день серийно выпускаемые трактора семейства «Беларус» комплектуются муфтами сухого сцепления, однако, мировая практика показывает, что на подобных тракторах устанавливаются «мокрые» муфты сцепления [2]. В настоящий момент для Минского тракторного завода подготовлена партия из пяти составов спеченного порошкового фрикционного материала для применения в муфте сцепления тракторов «Беларус-352». В 2016 году прошел стендовые испытания спеченный порошковый фрикционный материал на основе меди ФМ-15. Разработанный материал ФМ-15 представляет собой оловянистую бронзу, с введенными добавками антифрикционного и фрикционного назначения (графит, порошок стальной ПХ-30). Микроструктура материала ФМ-15 представляет собой однородный α -твердый раствор олова в меди, с равномерно расположенными частицами графита и порошка ПХ-30 по полю шлифа.

Проведенные стендовые испытания фрикционных дисков муфты сцепления показали:

- износ фрикционных дисков составил: первый (контактировавший с поршнем) — в пределах 0,04—0,06 мм, второй — 0,18—0,20 мм, третий — 0,30—0,35, четвертый — 0,16—0,17 мм;

- наработка материала составила 20000 циклов включения/выключения.

1. Дмитриевич А.А., Лешок А.В., Роговой А.Н., Сарока Д.И. Композиционные фрикционные материалы: основные виды и требования к ним // Порошковая металлургия. Сборник научных трудов. — Минск, Белорусская наука. — 2015, № 38
2. Карташевич А.Н., Скадурва А.Ф., Лешок А.В., Дмитриевич А.А. Материалы и конструктивные параметры фрикционных элементов механической трансмиссии тракторов // Вестник Белорусской Государственной сельскохозяйственной академии. — 2013, № 4, 234

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА АК7 КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ ШУНГИТОВЫМ НАНОУГЛЕРОДОМ

А.И. Комаров¹, В.И. Комарова¹, Н.Н. Рожкова², П.С. Золотая¹

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, al_kom@tut.by

²Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск, Россия

Постановка задачи. Широкое использование алюминиевых сплавов в производстве современной машиностроительной техники обуславливает необходимость повышения износостойкости деталей из этих сплавов. Перспективным методом является микродуговое оксидирование (МДО) с добавлением углеродных наноматериалов.

Цель работы — оценка эффективности использования шунгитового наноуглерода (ШУ) в МДО-процессе и исследование его влияния на структурные характеристики и триботехнические свойства сформированных на сплаве АК7 керамических покрытий (КП).

Материалы и методы. Микроплазменная обработка проводилась на сплаве АК7 в анодно-катодном режиме с применением силикатно-щелочного электролита — базового (4 г/л Na_2SiO_3 , 2 г/л КОН) и модифицированного ШУ с концентрацией 125 мг/л, 250, 500 мг/л. ШУ представляет собой природный материал [1] и в электролитах для МДО проявляет свойства, подобные ПАВАм, что является важным фактором для этого процесса.

Результаты и обсуждение. Участие ШУ в МДО-процессе интенсифицирует его (рис. 1, а, б), что следует из роста толщины в 1,5 раза (с 100 до 150 мкм).

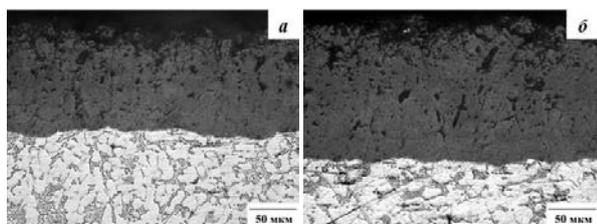


Рис. 1. Микроструктура КП без ШУ (а) и с его добавкой (500 мг/л, б)

Подобный результат получен ранее в ряде работ с использованием в МДО-процессе углеродных наноматериалов [2—4].

Посредством рентгенотруктурного анализа было установлено, что фазовый состав керамических покрытий представлен оксидами: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд), $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, (муллит). Установлено, что модифицирование покрытия ШУ приводит к увеличению в составе КП корунда и, как следствие, к росту прочностных свойств. Показано, что на расстоянии 40—60 мкм от основы содержание корунда в КП без добавок составляет 25—27%, в то время как в модифицированном ШУ покрытие — 58—67%. При этом наибольший эффект достигается при концентрации ШУ 250 мг/л. В частности, при этой концентрации

обеспечивается достижение уровня микротвердости H_c покрытия, равного 25 ГПа, что в 1,7 раза превышает значения этой величины для покрытия, полученного в базовом электролите (рис. 2, а).

В процессе триботехнических испытаний в режиме граничного трения при нагрузке $p = 30$ МПа образцы, модифицированные ШУ концентрацией $C = 500$ мг/л показывают наименьший коэффициент трения (рис. 2, б), однако минимальной интенсивностью изнашивания обладает КП с добавлением ШУ концентрацией 250 мг/л.

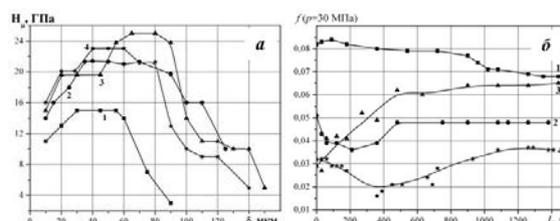


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине покрытий (а) и зависимость коэффициента f трения КП от пути трения (б): 1 — без добавок, 2 — 125 мг/л, 3 — 250 мг/л, 4 — 500 мг/л

Установлено, что введение добавки ШУ в базовый электролит приводит к интенсификации процесса микродугового оксидирования, увеличению толщины покрытий на сплаве АК7 в 1,2—1,5 раз. Обеспечивается повышение содержания высокотемпературной модификации оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в 1,5—2 раза, что определяет высокие прочностные и триботехнические свойства модифицированного ШУ керамического покрытия. Покрытия, сформированные с добавлением ШУ с концентрацией 250 мг/л обладают наилучшим фазовым составом, микротвердостью и наиболее высоким сопротивлением к изнашиванию. Такие параметры структуры и свойств достигнуты вследствие обеспечения седиментационной и агрегативной устойчивости электролитов-суспензий, дзэтта потенциал которых достигает значения, равного -39 мВ.

1. Рожкова Н.Н. Наноуглерод шунгитов. — Петрозаводск. — 2011
2. Комаров А.И., Витязь П.А., Комарова В.И., Рожкова Н.Н., Золотая П.С. // сб. науч. ст. «Наноструктуры в конденсированных средах». — 2016, 14—20
3. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение. — Мн. — 2013
4. Комаров А.И., Витязь П.А., Комарова В.И. Создание износостойких упрочняющих покрытий микродуговым оксидированием, непосредственной и последующей модификацией углеродными наноматериалами (монография) // Перспективные технологии: под ред. В.В. Клубовича. — Витебск. — 2011, Гл. 6, 114—148

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА АК7, МОДИФИЦИРОВАННОГО
НАНОКОМПОЗИЦИЕЙ SiC-AL₂O₃

А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда, Д.О. Искандарова

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; al_kom@tut.by

Постановка задачи. Силумин АК7 является одним из представителей системы Al-Si, содержащей добавки Cu, Mg, Mn, и широко применяется для изготовления литых изделий, предназначенных для машиностроения и авиационной техники. Сплавы этой системы, в частности АК7, относятся к дисперсионно-твердеющим материалам, упрочнение которых достигается термической обработкой, включающей закалку и последующее старение — естественное или искусственное. Перспективным приемом повышения прочностных и трибомеханических свойств является модифицирование АК7 упрочняющими компонентами, к которым относятся нерастворимые высокомодульные керамические наночастицы карбидов, боридов, нитридов, оксидов, вводимых в расплавы [1, 2]. В [3] разработан метод синтеза комплексного наноструктурированного карбидо-корундового наполнителя SiC- α -Al₂O₃. Показано, что введение этой наноконпозиции в расплав эвтектического силумина АК12М2МгН приводит к диспергированию его структуры и повышению триботехнических характеристик.

Цель работы — исследование влияния комплексного нанонаполнителя SiC- α -Al₂O₃ на структуру и трибомеханические свойства композиционных материалов на основе сплава АК7.

Материалы и методы. В качестве матрицы получения КМ использовали промышленный сплав АК7 (Si — 6—8; Fe — 1,3; Mn — 0,2—0,6; Ni — 0,3; Cu — 1,5; Mg — 0,2—0,5; Zn — 0,5 мас.%). Изготовление КМ осуществлялось путем введения пресовки SiC-Al₂O₃ в расплав (750 °С), выдержки при этой температуре 10—15 мин и последующей разливки в металлический кокиль. Структурное состояние образцов КМ исследовалось методами металлографического и рентгеноструктурного анализов. Определение микротвердости осуществлялось на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,196 Н. Триботехнические испытания выполнялись в среде масла И-40А по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела относительно неподвижного образца с пошаговым возрастанием давления (p): 10, 20, 30 МПа. Определялись коэффициент трения f , массовый износ Δm и интенсивность изнашивания I_q .

Результаты и обсуждение. Полученные результаты показали, что включение модификатора SiC-Al₂O₃ в расплав приводит к диспергированию зерен α -фазы (рис. 1) в 1,5—2 раза и некоторому увеличению доли эвтектики. Наблюдается образование игольчатой эвтектики с размером частиц Si 15—25 мкм, а также уменьшение размера интерметаллидных включений в 2 раза, что приводит к по-

вышению предела прочности (σ_B) на 25—30 МПа, относительного удлинения δ (табл. 1), а также триботехнических свойств КМ (табл. 2).

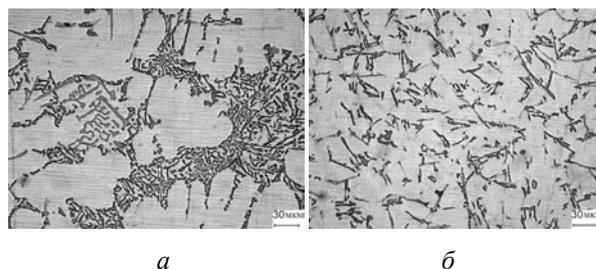


Рис. 1. Микроструктура сплава АК7 (а) и образца КМ2 (б)

Таблица 1. Доля модификатора (Q_m) SiC-Al₂O₃, эвтектики в КМ, их предел прочности σ_B , относительное удлинение δ , микротвердость H_v , твердость HV

Образец КМ	Q_m , %	$Q_{эвт}$, %	σ_B , МПа	δ , %	H_v , МПа		HV
					α -фаза	эвтектика	
АК7	—	19	120,1	3,2	627	796	82,1
КМ9	0,5	21	145,4	6,5	685	1095	74,8
КМ1	1,5	25	—	—	656	953	77,9
КМ2	3,0	26	152,7	4,4	775	946	77,4
КМ5	5,0	21	—	—	711	1183	79,3

Таблица 2. Коэффициент трения f , интенсивность изнашивания I_q образцов КМ при $p=10, 20, 30$ МПа

Образец КМ	Коэффициент трения f			I_q , 10 ⁻⁴ мг/м
	$p = 10$ МПа	$p = 20$ МПа	$p = 30$ МПа	
АК7	0,017	0,024	0,101*	8,73
КМ9	0,020	0,023	0,075*	0,676
КМ1	0,013	0,023	0,022	0,185
КМ2	0,010	0,011	0,024	4,25
КМ5	0,025	0,028	0,088*	21,48

* — Наступает стадия катастрофического изнашивания.

Диспергирование структуры КМ способствует повышению микротвердости эвтектики, снижению f и I_q , а также расширению диапазона нагрузок (табл. 2).

1. Комаров А.И., Комарова В.И., Орда Д.В. Синтез карбидо-корундового наполнителя и его воздействие на структуру и свойства поршневого сплава АК12М2МгН // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016, № 1 (34), 81—86.
2. Композиционный порошок и способ его получения: С01В31/30, С01В13/14 / А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда; заявитель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. — а 20160246 от 27.06.2016.
3. Комаров А.И., Комарова В.И., Шипко А.А., Орда Д.В. Воздействие синтезируемой наноконпозиции SiC-Al₂O₃ на структурообразование и триботехнические свойства композита на основе поршневого сплава АК12М2МгН // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017, № 1 (38), 71—78.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОЧАСТИЦ TiC-Al₂O₃ НА СТРУКТУРУ И ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА СПЛАВЕ Д16

А.И. Комаров¹, В.И. Комарова¹, С.А. Чижик², Т.А. Кузнецова², Т.И. Зубарь²

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; al_kom@tut.by

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Повышенные коэффициент трения и склонность к схватыванию ограничивают применение алюминиевых сплавов в трибосопряжениях. Одним из решений проблемы является формирование на рабочих поверхностях изделий износостойкого оксидокерамического покрытия методом микродугового оксидирования (МДО). При этом с целью повышения физико-механических и триботехнических характеристик покрытий их формирование осуществляют в электролитах с добавками дисперсных частиц различной природы [1].

Цель работы — исследование структуры, микротвердости и триботехнических характеристик покрытий, полученных на сплаве Д16 методом МДО.

Материалы и методы. Покрытие формировалось в анодно-катодном режиме в базовом электролите и с добавками наночастиц TiC-Al₂O₃ при концентрации 500—1000 мг/л. Синтез композиционных частиц осуществлялся в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси по разработанному способу [2]. Морфология изучалась на атомно-силовом микроскопе NT-206. Шероховатость R_q покрытий определялась на четырех участках каждого образцах с полем сканирования 20×20 мкм. Сила и коэффициент трения рассчитывались из угла закручивания консоли под действием латеральных сил при движении острия по поверхности образца.

Результаты и обсуждение. Согласно полученным данным, добавка в электролит наночастиц приводит к росту толщины покрытий в 1,8—2 раза, при этом максимальное значение (340 мкм) достигается при их концентрации 750 мг/л (табл. 1).

Помимо роста толщины, под воздействием наночастиц повышается микротвердость покрытий (рис. 1).

Таблица 1. Характеристика покрытий

№ образца	Концентрация частиц, мг/л	Толщина покрытия, мкм
1	—	165
2	500	300
3	750	340
4	1000	312

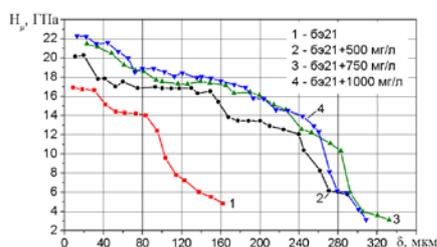


Рис. 1. Распределение микротвердости по толщине покрытий

При этом максимальный уровень микротвердости достигается при концентрации частиц 750 мг/л и практически не изменяется с дальнейшим увеличением их концентрации (до 1000 мг/л).

Исследование морфологии поверхности (рис. 2) показало, что добавка наночастиц TiC-Al₂O₃ в электролит в концентрации более 500 мг/л приводит к заметному росту шероховатости R_q (с 41,7 ± 2,0 до 115,3 ± 37,0 нм). Это может быть связано с включением в покрытие частиц карбида титана.

Результаты показали, что добавка частиц TiC-Al₂O₃ приводит к снижению коэффициент трения f (рис. 3) Так, при их концентрации 500 мг/л f снижается в 1,75 раза до значения 0,024 и продолжает снижаться с увеличением концентрации частиц до 750 мг/л (f=0,013). Однако дальнейшее повышение концентрации не изменяют триботехнические свойства покрытия, что можно связать с его насыщением частицами TiC-Al₂O₃.

Полученные данные согласуются с результатами испытаний в условиях граничного трения в масле И-20А в паре со сталью, где коэффициент трения снижается в 1,5—3 раза с ростом концентрации добавки в растворе.

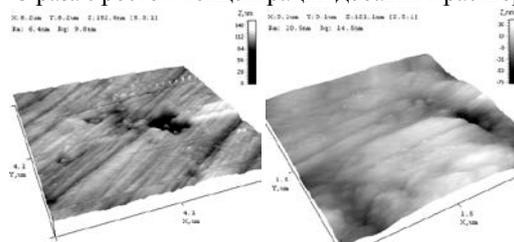


Рис. 2. Топография покрытий (а — без добавок; б — 750 мг/л)

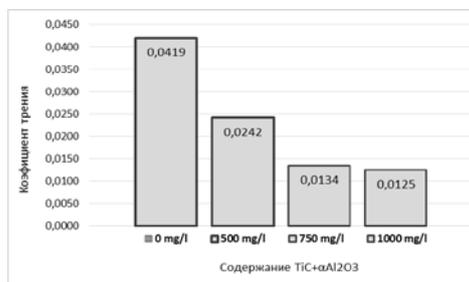


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от концентрации частиц в базовом электролите

1. Комаров А.И. Структурообразование и свойства керамических покрытий, формируемых при микродуговом оксидировании сплава АМг6 в электролите с добавками наночастиц TiC // Физика и химия обработки материалов. — 2016, № 4, 45—51
2. Комаров А.И., Комарова В.И., Орда Д.В. Композиционный порошок и способ его получения. Заявка на изобретение № 20160246 РБ от 27.06.2016 г.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ БУТАДИЕН НИТРИЛЬНЫХ РЕЗИН УГЛЕРОДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

М.А. Попова, В.Ю. Галась

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; m.a.popova.belsut@mail.ru

Введение. Аморфные углеродные покрытия, обладающие низким коэффициентом трения, высокой микротвердостью и химической инертностью [1] нашли применение при поверхностном модифицировании резино-технических изделий [2], в частности уплотнительных элементов гидро- и пневмосистем, таких как манжеты и кольца [3]. Особый интерес для изучения представляет легирование углеродных покрытий, которые обладают новыми свойствами.

Цель — исследование структуры, стойкости к воздействию гидравлического масла и триботехнических характеристик бутадиен нитрильной резины с покрытиями на основе углерода.

Материалы и методы. Модифицированию подвергались образцы листовой бутадиен нитрильной резины. Покрытия формировались из плазмы импульсного катодно-дугового разряда с центральным электродом из графита. Углеродное покрытие содержащее азот/фтор формировалось в среде азота/фреона при его давлении 0,1/0,2 Па. В двухслойном покрытии первый слой формировался в среде азота при давлении 0,1 Па, второй в среде фреона при его давлении 0,2 Па. Толщина покрытий составляла ~ 0,1 мкм.

Триботехнические характеристики покрытия исследовались на возвратно-поступательном микро-трибометре по схеме трения сфера — плоскость при нагрузке 1 Н и скорости скольжения с 0 до 32,5 мм/с по длине дорожки трения. Численные расчеты, анализ и визуализация производилась при помощи программного обеспечения Python (x, y).

Топография покрытий исследовалась при помощи растрового электронного микроскопа Tescan «VEGA II LMU»

Стойкость резины к воздействию гидравлического масла (ГМ) определялась по ГОСТ Р ИСО 1817-2009 путем измерения массы резины до и после погружения в ГМ Mobil DTE 25. Испытания производились при полном погружении образцов в масло с температурой 70 °С на 336 ч.

Результаты и обсуждение. Углеродные покрытия имеют блочную структуру, которые, по нашему мнению, можно объяснять внутренними напряжениями в самом покрытии, возникающими при его нанесении.

На размер блоков покрытия влияет состав, температура. При нанесении покрытий в среде азота или фреона происходит увеличение блочной структуры.

Коэффициент трения (f) исходной резины на начальном этапе триботехнических испытаний до-

стигает высоких значений 1,45 с постепенным уменьшением до 0,75. Происходит изнашивание поверхности с образованием «скаток» на дорожке трения. Нанесение углеродных покрытий приводит к более низкому значению f с последующей их стабилизацией на уровне 0,3—0,6, а также к изменению характера трения. Известно, что при сухом трении f снижается по мере увеличения нагрузки, в то время как при наличии смазки наоборот [4], т.е. покрытие выполняет роль смазки. Блочная структура покрытия в процессе трения дробится на более мелкие составляющие. Так же следует отметить, что по прошествии 7 тыс. циклов покрытия сохранились на поверхности образцов, что свидетельствует о достаточной адгезии блоков к подложке.

Триботехнические и адгезионные характеристики покрытия так же можно оценить по изменению мгновенного коэффициента трения (f_m) по длине дорожки трения.

В ходе испытаний были замечены различный характер поведения f_m в зависимости от вида покрытия. Для углеродного покрытия характерны наибольшее значения f_m на крайних участках дорожки трения, где изменяется направление движения индентора и, соответственно, действует наименьшая скорость скольжения. Для азот- и фторсодержащих покрытий наблюдалось более равномерное распределение f_m по длине дорожки, но с наибольшими значениями f_m при максимальной скорости скольжения по центру дорожки трения.

В результате испытания стойкости резины к воздействию ГМ наблюдалось уменьшение массы образцов («усыхание»). Вероятно, это объясняется преобладанием процесса экстракция растворимых компонентов, предположительно пластификатора, над поглощением жидкости резиной. Было установлено, что углеродные покрытия не препятствуют процессу «усыхания», однако при их легировании азотом и фтором наблюдается обратная ситуация. Наименьшее изменение массы показал образец с углеродным покрытием в среде азота, усыхание уменьшилось на 13% по сравнению с немодифицированным образцом.

1. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // Materials Science and Engineering. — 2002 (37), 129—281
2. Pei Y.T., Bui X.L., van der Pal J.P., Martinez-Martinez D., and De Hosson J.Th.M. Flexible Diamond-Like Carbon Film Coated on Rubber // Progress in Organic Coatings. — 2013 (76), no. 12, 1773—1778
3. Зуев Ю.С., Дегтева Т.Г. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях — М.: Химия. — 1986
4. Мур Д.Ф. Трение и смазка эластомеров / пер. с англ. Г.И. Бродский. — М.: Химия. — 1977

РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ДИФФУЗИОННОГО ВВЕДЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ СТАЛИ

Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников, Е.С. Новиков

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия; ymigal@mail.ru

Введение. Предложен новый метод упрочнения стальных поверхностей узлов трения, основанный на диффузионном насыщении поверхностных слоев атомами упрочняющих элементов. На основе проведенных нами ранее квантово-химических расчетов [1, 2] выделена группа элементов, энергия связи которых с границами зерен железа превышает или сопоставима с энергией связи Fe–Fe. Часть из этих элементов, которые обладают малой растворимостью в объеме зерен железа и по этой причине могут длительно оставаться на поверхности зерен, являются перспективными для упрочнения поверхностных слоев железа. К ним относятся В, Sc, Zr, Nb, Hf, Ta. Среди этих элементов следует выделить бор, который к тому же обладает малым атомным радиусом и большим коэффициентом диффузии в железе.

В отличие от известного метода химико-термической обработки (ХТО), в котором борирование поверхности стали проводится при высоких температурах, нами предлагается обработка поверхности при температурах ниже 750 °С. Преимущество такого подхода состоит в том, что на поверхности стали при этом не возникают бориды железа FeB и Fe₂B. Эти соединения наряду с упрочнением поверхности повышают ее хрупкость. (Как известно, при быстропеременном механических воздействиях на металл повышенная хрупкость поверхности может привести к ее разрушению.) Нами в настоящее время рассматриваются два принципиально отличающихся способа борирования поверхности стали.

Первый способ состоит в том, что на очищенную от оксидов поверхность образца наносится обмазка из борсодержащих соединений. В дальнейшем эта поверхность прогревается при температуре в диапазоне 700—750 °С. В обмазке происходит атомизация бора. Свободные атомы бора, попадая на поверхность стали, благодаря слабой растворимости бора в стали, проникают не в объем зерен в стали, а распространяются в ней по границам зерен. В результате атомы бора насыщают эти границы, вытесняя оттуда атомы серы и фосфора. (Как известно, сера и фосфор относятся к элементам, разупрочняющим сталь.) Введение бора в поверхностные слои железа должно сопровождаться упрочнением этих слоев. Поскольку атомы бора остаются на границах зерен, а объем этих границ на несколько порядков меньше, чем объем всего металла, то оказывается, что для упрочнения поверхности стали достаточно

малого количества бора. Проведенные испытания образцов из стали 65Г, борированных по разрабатываемой нами технологии, показали, что их износостойкость приблизительно такова же, как и износостойкость образцов, борированных по ХТО-технологии. С другой стороны, в поверхностных слоях стали не обнаружены бориды железа. Таким образом, наш подход обладает достоинствами ХТО-технологии, но лишен ее основного недостатка — повышения хрупкости, обусловленной наличием боридов железа.

Второй способ борирования, изучаемый нами, основан на процессе, имитирующем воздействие тормозных колодок на поверхность стального колеса. Наши предыдущие исследования взаимодействия тормозной колодки с колесом продемонстрировали возможность диффузии элементов, входящих в состав колодки, в поверхностный слой колеса. В частности, ранее нами был зафиксирован ряд элементов, входящих в состав тормозных колодок и перенесенных в процессе эксплуатации в поверхностные слои колеса [3]. В соответствии с этим, если при изготовлении детали, имитирующей тормозную колодку, ввести в ее состав борсодержащие соединения и затем осуществить тормозной контакт этой детали с испытуемым образцом, атомы упрочняющих элементов будут диффундировать из детали в металл и, в конечном счете, упрочнять в поверхностный слой металла. Способствовать такому процессу будут высокие температуры и давления, возникающие на трибоконтакте.

В настоящее время проводятся испытания этих двух способов борирования.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10467).

1. Migal Yu. F., Kolesnikov V. I., Kolesnikov I.V. Impurity and Alloying Elements on Grain Surface in Iron: Periodic Dependence of Binding Energy on Atomic Number and Influence on Wear Resistance // Computational Materials Science. — 2016 (32), 503—512
2. Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Колесников И.В., Новиков Е.С. Совместимость химических элементов на границах зерен в стали // Доклады Академии Наук. — 2015 (464), № 1, 51—55
3. Колесников В.И., Козаков А.Т., Мигаль Ю.Ф. Исследование процессов трения и изнашивания в системе колесо-рельс с помощью методов рентгеноэлектронной, оже-электронной спектроскопии и квантовой химии // Трение и износ. — 2010 (31), № 1, 24—37

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОСФАТНЫХ И СИЛИКАТНЫХ ПРИСАДОК С ОКИСЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖЕЛЕЗА

Ю.Ф. Мигаль, И.А. Майба, К.И. Карпенко

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия; umigal@mail.ru

Введение. Проведено квантово-химическое моделирование взаимодействия соединений, содержащих фосфаты и силикаты, с поверхностью железа. Соединения такого типа в последние годы относятся к наиболее перспективным антифрикционным и противоизносным присадкам (см., напр., [1]). Каждое из этих веществ обладает своими достоинствами. Силикатные присадки обладают высокой нагрузочной и температурной устойчивостью смазочного слоя при работе в режимах схватывания и заедания. Фосфатные присадки характеризуются большей склонностью к полимеризации, что при невысоких механических нагрузках и сравнительно высоких температурах позволяет получать более низкий коэффициент трения. Естественно ожидать, что, комбинируя эти соединения, т.е. создавая систему присадок и оптимизируя ее химический состав, можно получить более широкий набор свойств по сравнению со свойствами отдельных присадок. Важным этапом на этом пути является сравнительный анализ поведения различных комбинаций таких присадок на ювенильной и окисленной поверхностях железа.

Методика расчетов. Расчеты проводились с помощью пакета программ ADF [2], основанного на приближении DFT. Использовалась модель двуперiodической пластины. В рамках этой модели поверхность металла с адсорбированным на ней слоем присадок имитируется несколькими моноатомными слоями железа с нанесенными на верхний слой молекулами присадок. Характерной особенностью рассматриваемых присадок является наличие в их составе концевых групп $(\text{SiO}_4)^{n-}$ и $(\text{PO}_4)^{n-}$. Именно эти группы и рассматривались в расчетах как простейшая модель присадок. Для обеспечения электронейтральности каждой ячейки периодической пластины дополнительно вводились ионы водорода H^+ , которые замыкали разорванные связи в молекулах присадок [3]. Рассматривалась адгезия присадок на ювенильной и окисленной поверхностях железа с индексами Миллера (100) (ОЦК решетка). На рис. 1 изображена модельная система, соответствующая адсорбции силикатной и фосфатной групп (в пропорции 1:1) на окисленной поверхности.

Результаты и обсуждение. В расчетах оценивались энергия связи модельных систем в расчете на одну ячейку и энергия адгезии (в данном случае это энергия, необходимая для отрыва молекул присадок от окисленной или ювенильной поверхности металла). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

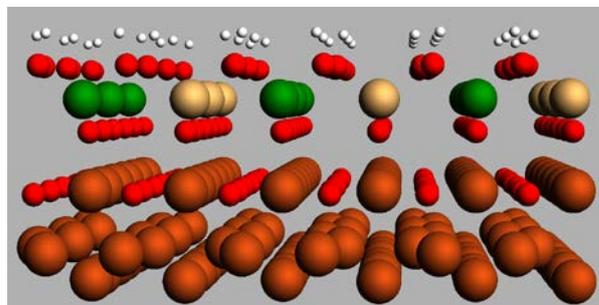


Рис. 1. Модельная система, состоящая из трех слоев атомов Fe, слоя атомов O и группы молекул $\text{SiO}_4 + \text{H}_2$, $\text{PO}_4 + \text{H}_2$. Изображены 3×3 ячеек периодической пластины

Таблица 1. Энергия связи E_1 адсорбционных комплексов и отдельных подсистем и энергия адгезии E_2 в расчете на одну ячейку

Многоатомные системы (состав атомов в одной ячейке)	E_1 , эВ	E_2 , эВ
12Fe	-105,7	—
2SiO ₄ + 4H	-85,5	—
2PO ₄ + 4H	-87,2	—
SiO ₄ + PO ₄ + 4H	-86,0	—
12Fe + 4O (4-fold)	-140,9	—
12Fe + 2SiO ₄ + 4H	-206,1	14,9
12Fe + 2PO ₄ + 4H	-200,1	7,2
12Fe + SiO ₄ + PO ₄ + 4H	-203,6	11,9
12Fe + 4O + 2SiO ₄ + 4H	-235,3	8,9
12Fe + 4O + 2PO ₄ + 4H	-234,8	6,7
12Fe + 4O + SiO ₄ + PO ₄ + 4H	-235,5	8,6

Выводы. 1) Сравнивая полученные значения энергии адгезии силикатных и фосфатных групп на ювенильной и окисленной поверхностях, видим, что энергия адгезии обоих типов присадок уменьшается при окислении поверхности. Этот факт объясняется тем, что химическая активность ювенильной поверхности железа ослабляется при окислении.

2) Внутренние связи более прочны в группе $(\text{PO}_4)^{n-}$, но с поверхностью более прочно связана группа $(\text{SiO}_4)^{n-}$.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-08-00724-а).

- Shanhong Wan, et al. An Overview of Inorganic Polymer as Potential Lubricant Additive for High Temperature Tribology // Tribology International. — 2016 (102), 620—635
- te Velde G., et al. Chemistry with ADF. — 2001 (22), 931—967
- Майба И.А., Мигаль Ю.Ф., Бекетов А.С., Савенкова М.А. Компьютерное моделирование и прогнозирование свойств системы присадок к смазочным материалам // Вестник ГГУПС. — 2016 (4), 41—48

PERFORMANCE EVALUATION OF ENVIRONMENTALLY-FRIENDLY GREASE

A. Kupčinskas¹, R. Kreivaitis², and G. Venckevičius³¹ Institute of Power and Transport Machinery Engineering, Aleksandras Stulginskis University, Kaunas, Lithuania; daimleris@gmail.com

Keywords: biological oils, four-ball test, tribological properties.

Introduction

Environmentally friendly products are valuable for low air, water and soil pollution, minimal threat to health, as well as the biodegradation. Lubricants affect the environment in all production, usage and disposal stages. Some loss of oil by accident or leakage during the use in areas such as agriculture, forestry, mining, roads and bodies of water may cause ecological disasters [1—2].

Recently, attention to bio lubricants produced from renewable resources, growing because of their inherent biodegradation, low toxicity and environmental friendliness [3—4].

Materials and Methods

Two bio based grease were made by blending different concentrations of coconut oil and bees wax (10 and 20 % by wt.). Coconut oil was used as base oil, while bees wax — as a thickener. Four-ball type tribotester was used to perform tribological tests. The test load was 150 N, duration 1 hour. The wear scar diameter on three stationary balls was measured with an optical microscope. During the test the friction torque between the balls and temperature change of sample were recorded.

Results and Discussion

Friction torque variations in the tests are presented in Fig.1. It can be seen from the graph (a) that starting from 200 s friction increases due to the grease consistency, which has not yet reached its operating temperature and incomplete distribution between balls. When grease is heated up and distributes evenly between the balls, friction decreases and has a tendency to decline till the end of the test. The average friction torque for grease thickened with 10% of bees wax is 51 mNm, while the maximum reaches 71 mNm.

The graph (b) shows that between 0 and 200 s, friction increases and at 1500 s stabilizing and constantly decreases till the end of the test. Average friction of 20% bees wax thickened grease is 49 mNm, while the

maximum friction reaches 66 mNm.

By the structure of friction 10% and 20% concentration thickened greases act very similar and have tendency to decrease at the end of the test. This is witnessed good tribological properties. This is confirmed by the average friction results.

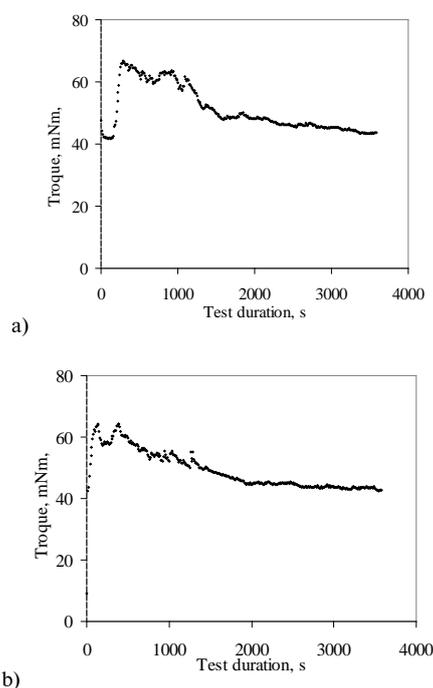


Fig. 1. Friction variation during the test using 10% (a) and 20% (b) bees wax thickened grease

1. Bartz W.J. ECOTRIBOLOGY: Environmentally Acceptable Tribological Practices // In "World Tribology Congress 2009". — Japan. — 2009, D-211
2. Sukirmo R.F., et al. Friction, Biogrease Based on Oil and Lithium Soap Thickener: Evaluation of Antiwear Property // World Applied Sciences Journal. — 2009, no. 6 (3), 401—407, ISBN 1818-4952.
3. Kajdas CZ. Re-refined Base Oil: quality and Ecology. In 4th European Re-refining Congress. — Brussel. — 2009
4. Shashidhara Y.M. and Jayaram S.R. Vegetable Oils as a Potential Cutting Fluid — An Evolution // Tribology International. — 2010, no. 43, 1073—1081

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИСАДОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕПЛОВОЗНЫХ МАСЕЛ

М.О. Бабушкин¹, Е.Н. Волнянко²

¹ СООО «ЛЛК-НАФТАН», Новополоцк, Беларусь;

² Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; volniano@mail.ru

Введение. В странах Таможенного союза развитие железнодорожного транспорта направлено в сторону использования электрического подвижного состава. Однако значительная часть грузо- и пассажироперевозок осуществляется все еще на неэлектрифицированных участках железных дорог. Парк тепловозов требует значительной модернизации, которая проводится хотя и не стремительно, но имеет тенденцию к планомерному росту. Очевидно, что эти объективные процессы развития железнодорожного транспорта требуют новых не только инженерных решений, но и современных материаловедческих разработок, в частности, смазочных материалов нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками и длительным ресурсом. В настоящее время в локомотивах наиболее широко используется дизельный двигатель Д 46, для надежной работы которого требуется масло класса Д2. Тяжелые условия, в которых работает масло, обуславливают необходимость создания масла с улучшенной термоокислительной стабильностью и устойчивостью к механической деструкции.

Цель работы — улучшить термоокислительную стабильность масла, применяя функциональные присадки.

Материалы и методы. В качестве загущающих присадок использовали ряд товарных продуктов различных производителей:

- 1 — сополимер стирола с бутациеном звездобразного типа;
- 2 — этилен-пропиленовый каучук;
- 3 — сополимер этилена с пропиленом;
- 4 — полиалкилметакрилат.

Образцы загущенных базовых масел обозначены по номеру загустителя.

Исследовали загущенные базовые и загущенные масла с вовлечением пакета присадок, содержащего антиокислительный, антифрикционный, моющий компоненты, пеногаситель.

Для оценки термостабильности моторных масел всех видов использовали установку ДК-НАМИ согласно ГОСТ 11063-77. Исследования проводили, нагревая масло и термостатируя его 30 часов при температуре 200 ± 2 °С. После охлаждения масел измеряли их вязкость.

Процессы старения масла и влияние температуры на количество высокотемпературных отложений исследовали, используя методику экспресс мониторинга на приборе TEOST, моделирующем термическое окисление моторных масел. По результа-

там теста оценивают количество отложений на испытуемом стальном стержне, а в реальных механизмах на поршне двигателя. Применяли метод 33С согласно ASTM 7097, который позволяет проводить циклический нагрев масел до 480 °С в присутствии катализатора окисления. После проведения эксперимента была проанализирована вязкость испытуемого масла и отложения на тестируемом стержне.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены результаты изменения кинематической вязкости загущенных базовых масел после испытаний по ГОСТ 11063-77 на установке ДК-НАМИ. Лучший результат показал 2 образец, т.к. изменение вязкости после термического воздействия практически не наблюдали. Образцы 1 и 4 показали противоположные эффекты: снижение и увеличение вязкости, что свидетельствует о различном механизме термической деструкции полимеров-загустителей.

Таблица 1. Изменение вязкости базовых масел с загустителями различных производителей (без присадки)

Кинематическая вязкость v_{100} , мм ² /с	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
до окисления,	13,83	12,51	15,92	15,10
после окисления,	9,79	12,89	12,96	19,26
Δv_{100} , %	-29,12	3,04	-19,0	28,0

В загущенные масла был вовлечен пакет присадок, способствующий снижению термоокислительной деструкции масел. В табл. 2 показаны сравнительные результаты тестирования по методу TEOST 33С загущенных базовых масел и загущенных масел, содержащих пакет присадок. Имеет место значительное снижение отложений.

Таблица 2. Влияние пакета присадок на количество высокотемпературных отложений после тестирования образцов

Наименование масла	Образец 1	Образец 1 (с присадкой)	Образец 4	Образец 4 (с присадкой)
Количество отложений после испытаний, мг	5,8	0,7	9,5	6,8

Таким образом, показано, что для создания современных моторных масел необходимо модифицировать загущенные масла пакетом присадок оптимального состава, учитывая природу и физико-химические свойства загущающих присадок и базового масла.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КОМПЛЕКСНЫХ КАЛЬЦИЕВЫХ МЫЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

А.Л. Богданов, С.Ф. Ермаков

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
al.bogdanov@tut.by

Введение. В настоящее время имеют достаточно широкое применение пластичные смазочные материалы (ПСМ) на комплексных кальциевых мылах, т.к. это достаточно эффективные и универсальные высокотемпературные смазочные материалы. Они могут использоваться в широком диапазоне температур от -35 до 160 °С в различных узлах трения, в том числе и в достаточно тяжело нагруженных: редуктора, зубчатые передачи, шарниры, цепные передачи и т.д. Благодаря своим эксплуатационным свойствам, высокой водостойкости и хорошей адгезии также могут применяться во влажно-агрессивных средах химического производства.

Тем не менее, на сегодня актуальными являются исследования, направленные на удешевление производства и повышение качества таких смазочных материалов.

Цель

Разработка технологии получения ПСМ на комплексных кальциевых мылах с использованием промежуточных продуктов нефтепереработки.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись ПСМ на комплексных кальциевых мылах. В качестве дисперсионной среды использовались промежуточные продукты нефтепереработки — дистилляты вакуумные. В качестве загустителя использовались комплексные мыла полученные в результате омыления синтетических жирных кислот и нейтрализации низкомолекулярной органической кислоты суспензией гидроксида кальция. Стабилизирующий компонент готовился на основе жидкокристаллических соединений холестерина, стабилизированных алкилсульфонатами кальция.

Полученные образцы ПСМ подвергались химическому анализу, а также исследовались их реологические и триботехнические параметры. Замерялись: содержание свободных щелочей, температура каплепадения, предел прочности на сдвиг, пенетрация, коллоидная стабильность, а также противозносные свойства на четырехшариковой машине трения (ЧШМ).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований разработана технология получения ПСМ на комплексных кальциевых мылах с использованием промежу-

точных продуктов нефтепереработки. Ключевой особенностью разработанной технологии является использование в составе ПСМ стабилизатора структуры на основе масляного концентрата жидкокристаллических соединений холестерина, стабилизированных алкил-сульфонатами кальция. Жидкокристаллические соединения холестерина ускоряют процесс комплексообразования на начальных этапах технологического процесса, о чем свидетельствует значительный рост вязкости реакционной массы в диапазоне температур комплексообразования, которая затем стабилизируется и экстремально возрастает на стадии охлаждения.

Эффективная концентрация стабилизатора структуры находится в пределах 12—15%. Основным эффектом применения указанного стабилизатора структуры является снижение температуры термообработки в процессе получения ПСМ более чем на 30—50 °С, а также продолжительности технологического процесса, при этом достигаются достаточно высокие качественные показатели конечного продукта. Предел прочности на сдвиг разработанных ПСМ составил 200—600 Па, температура каплепадения больше 310 °С, пенетрация в зависимости от содержания загустителя от 280 до 340 мм⁻¹, коллоидная стабильность 4—9%, диаметр пятна износа на ЧШМ менее 0,65 мм. Следует отметить, что применение указанного выше стабилизатора структуры позволяет получить ПСМ с высокими противозадирными свойствами — разработанные ПСМ не имеют четко выраженной критической нагрузки, график нагрузочной способности близок к линейному до нагрузки сваривания.

Использование дистиллята вакуумного нефтяного в качестве дисперсионной среды вместо минерального масла для разработанных ПСМ позволяет существенно снизить себестоимость производства, однако присутствие большого количества высокомолекулярных углеводородов в составе дистиллята вакуумного нефтяного ограничивает возможность применения ПСМ при отрицательных температурах.

Таким образом, разработана технология получения ПСМ на комплексных кальциевых мылах достаточно высокого качества, при этом обладающих повышенными реологическими и триботехническими свойствами при существенном сокращении времени их производства и энергозатрат.

ВЛИЯНИЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

С.П. Богданович¹, В.М. Станкевич²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; sergiy@bk.ru

²Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, Гомель, Беларусь

Цель. В настоящее время для деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных и химически активных сред, актуальной является разработка новых материалов, в том числе на базе полимеров, с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Повышение показателей механических свойств и износостойкости полиолефинов возможно путем их радиационного модифицирования. В связи с этим представляет интерес изучить, как сопутствующее такому модифицированию радиационно-инициированное окисление полимерного образца в поле ионизирующего излучения влияет на прочностные и триботехнические характеристики материала.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовали полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) в дисперсном виде и в гранулах. Формирование блочных образцов ПЭВП осуществляли методом литья под давлением; пленочные образцы получали горячим прессованием. Гамма-облучение образцов проводили в радиационно-химической установке РХМ-гамма-20. Гель-, золь-фракцию облученного ПЭВП определяли методом гель-, золь-анализа. Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) применяли для оценки сегментальной подвижности макромолекул. Триботехнические характеристики исследуемых образцов изучали на машине трения по схеме контакта «ролик-вкладыш». Разрушающее напряжение при растяжении определяли на универсальной испытательной машине.

Результаты и обсуждение. Воздействие гамма-излучения на ПЭВП в кислородсодержащей среде проявляется в образовании полярных групп, содержащих атомы кислорода, и свободных радикалов [1], причем окисление происходит преимущественно в поверхностных слоях полимера [2]. Исследования влияния потока гамма-квантов на особенности формирования сшитой структуры граничных слоев блочного ПЭВП в кислородсодержащей среде показали, что количество растворимой фазы (золь-фракции) снижается с увеличением глубины, а затем стабилизируется. Полученные данные указывают на наличие в поверхностных слоях градиента свойств, вызванного воздействием диффундирующего кислорода, в направлении нормали к рабочей поверхности образца: прочностные характеристики с глубиной возрастают, а концентрация золь-фракции уменьшается.

Также показано, что радиационно-инициируе-

мое окисление пленочных образцов ПЭВП приводит к изменению кинетических параметров макромолекул (сегментальная подвижность макромолекул, энергия активации вращения), оцениваемых методом парамагнитного зонда.

Оценка прочностных характеристик образцов ПЭВП, облученных на воздухе, показала, что значительное влияние на формирование сшитой структуры оказывает толщина образца. Облучая образцы толщиной 200—250 мкм, можно получить немонотонную зависимость разрушающего напряжения с минимумом при дозах 0,6—0,8 МГр. Это является следствием воздействия кислорода на поверхностные слои материала, косвенно свидетельствует о протекании окислительной деструкции макромолекул.

Показано, что гамма-облучение, проводимое в кислородсодержащей среде, повышает не только прочностные, но и триботехнические характеристики образцов ПЭВП. Так, полученная зависимость массового износа ПЭВП за первый час трения от дозы облучения свидетельствует о постепенном снижении исследуемого параметра и, в конечном итоге, его стабилизации при дозе 1,0 МГр. Зависимость скорости изнашивания в стационарном режиме имеет немонотонный характер с достижением минимальных значений в области доз 1,0 МГр. Кроме того, следует отметить, что подобная обработка полиэтилена позволяет достичь снижения коэффициента трения до 3,5 раз.

Проведенные исследования показали, что гамма-облучение полиэтилена в кислородсодержащей среде, позволяет создавать поверхностные слои со специфической структурой (с градиентом свойств по глубине): тонкий окисленный поверхностный слой с низкой прочностью и сшитый подповерхностный слой с повышенной прочностью, что позволяет улучшить триботехнические характеристики ПЭВП: снизить коэффициент трения до 3,5 раз и интенсивность изнашивания до 5 раз. Свойства указанной структуры могут изменяться за счет варьирования условий ее получения (дозы облучения, состава среды и т.п.), что потенциально подходит для получения полимерных деталей с требуемым комплексом эксплуатационных свойств.

1. Миличук В.К., Клишпонт Э.Р., Пшежецкий С.Я. Макрорадикалы. — М.: Химия. — 1980
2. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры. — М.: Изд-во иностр. лит. — 1962

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ CrN/AlN, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

И.М. Букарев, А.И. Залеснов, А.В. Соболюков

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия; alexey_zalesnov@mail.ru

Цель — изучение износостойкости покрытий системы CrN/AlN, полученных магнетронно-ионным реактивным распылением.

Материалы и методы. Синтез различных вариантов покрытия CrN/AlN выполнен методом магнетронно-ионного реактивного распыления на установке UNICOAT 600 SL.

При напылении покрытий использовали два планарных, прямоугольных магнетрона на постоянных магнитах с мишенями из Cr (ЭРХ-1) и Al (Ад7) на первом и втором магнетронах соответственно. В качестве реактивного газа использовали азот (N₂). Для получения многослойной структуры магнетроны располагались в центре рабочей камеры спина к спине так, чтобы потоки ионов металла мишеней были направлены в противоположную друг от друга сторону. Вокруг магнетронов на специальной оснастке вращались подложки, что позволило получить многослойную структуру покрытия. В качестве подложек использовали диски диаметром 20 мм, изготовленные из стали 4X5MФС. Подготовку поверхности подложек, напыление адгезионных слоев покрытия проводили в соответствии с методиками, описанными в работах [1, 2]. В качестве варьируемых факторов принимали ток разряда на первом и втором магнетронах соответственно. Измерение коэффициента абразивного износа покрытий проводили методом микроабразивного износа, основанного на модели Арчарда для скользящего износа. После остановки испытаний, с помощью метода оптической микроскопии проводили измерения диаметра лунки износа d_c , образовавшейся на поверхности покрытий, рассчитывали ее объем, что позволило вычислить величину k_c .

Результаты и обсуждение. Измерения микротвердости показали, что в зависимости от периода слоев L и относительного содержания хрома, микротвердость изменяется в широком диапазоне 32—42 ГПа. Максимальная твердость соответствует вариантам покрытий с большими значениями периода слоев покрытия, в меньшей степени на твердость оказывает влияние относительное содержание хрома. Для рассматриваемых покрытий модуль упругости изменялся в диапазоне 350—420 ГПа. Снижение разности величин модуля упругости подложки и покрытия способствует повышению работоспособности системы «подложка—покрытие» при воздействии внешних термомеханических нагрузок за счет создания благоприятного характера распределения напряжений на границе раздела и, как следствие, повышает эффективность применения покры-

тий [3]. Одним из показателей, характеризующих сопротивление покрытия износу является величина H/E , называемая индексом пластичности материала. Зависимость H/E от периода слоев покрытия имеет нелинейный характер и изменяется в интервале 0,09—0,115. Полученные значения индекса пластичности соответствуют многокомпонентным нитридным и карбидным покрытиям [4, 5]. Максимальное значение величины $H/E = 0,115$ достигается при значении $L = 3,2$ нм, что соответствует вариантам покрытий с максимальной твердостью. Однако, при минимальных значениях периода $L = 1,5$ нм и высоком содержании Cr, также отмечены достаточно большие значения величины $H/E = 0,1$. В тоже время, при $L = 2—2,5$ нм наблюдается падение величины H/E относительно пиковых значений. Микроскопический анализ лунок износа показал, что лунки износа имеют ровные края, а при используемых режимах испытаний не происходит полного истирания покрытия до подложки. Величина d_c для изучаемых покрытий изменяется в диапазоне 368—399 мкм. На основе экспериментально определенных значений d_c были вычислены коэффициенты абразивного износа, которые изменяются в интервале $(2,0—2,8) \times 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Минимальные значения величины износа достигнуты при максимальном периоде слоев покрытия, т.е. при максимальной твердости, что хорошо согласуется с классической теорией износа. В тоже время, высокая износостойкость наблюдается и при малом периоде слоев покрытия, что свидетельствует о корреляции величин H/E и k_c .

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-38-00819 мол_а).

1. Букарев И.М., Аборкин А.В. Исследование свойств многослойных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2012, № 5, 16—19
2. Букарев И.М., Аборкин А.В. Влияние режима напыления на структуру и свойства многослойных нитридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013, № 11, 33—38
3. Aborkin A.V., Ryabkova V.V., Elkin A.I. Deformation Curves for Multicomponent Nitride and Carbide Coatings // Journal of Friction and Wear. — 2015 (36), no. 4, 273—279
4. Aborkin A.V., Ryabkova V.V., Abramov D.V. Friction and Wear of Nitride and Carbide Coatings in Contact with Aluminum // Journal of Friction and Wear. — 2013 (34), no. 4, 294—301
5. Аборкин А.В., Рябкова В.В., Сергеев А.В. Исследование трибологических свойств многослойных и многокомпонентных вакуумных ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2012, № 5, 12—15

ТОНКОСЛОЙНАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ СМАЗОК ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

А.Я. Григорьев¹, И.Н. Ковалёва

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель; aygri@tut.by

Введение. Растительные масла являются наиболее перспективной экологически безопасной альтернативой смазкам из углеводородного сырья. Их триботехнические характеристики не хуже, чем у чистого минерального масла и имеют значительный потенциал своего улучшения с помощью функциональных присадок. Поскольку свойства триглицеридов и нафтенов различны, то известные решения здесь не применимы и поиск присадок для смазок на основе растительного сырья требует изучения механизмов их срабатываемости.

Основными причинами деградации растительных смазок при трении являются гидролиз, окисление и пирогенический распад. Наличие и соотношение образующихся при этом свободных жирных кислот, глицерина, моно- и диглицеридов, полимерных соединений и высших спиртов, позволяет установить действующие механизмы и выбирать присадки, блокирующие нежелательные процессы. Известные методы, используемые для анализа этих веществ очень трудоемки, и разработка простого экспресс-метода химического анализа растительных масел является весьма актуальной задачей.

Цель работы — оценка возможностью качественного анализа химического состава смазочных масел на основе растительного сырья методом бумажной тонкослойной хроматографии.

Материалы и методы. Исследовались образцы рапсового, подсолнечного, кукурузного и льняного масел. Часовые испытания на трение проводили на четырехшариковой машине ЧШМ-К1.

Пробы чистых и отработанных масел подвергали одномерной тонкослойной хроматографии по методике, предложенной в работе [1]. Разделение проводили на ватмане марки А. Элюент готовили смешением гексана и этанола в соотношении 10:0,25. Пробу раствора масла в хлороформе (0,1 г/мл) с помощью пипет-дозатора (~3—5 мкл) наносили на линию старта полоски ватмана размером 5×15 см. Полученный препарат сушили на воздухе и помещали вертикально в хроматографическую камеру, погружая полоску на 0,5 см в элюент. После поднятия растворителя на 10 см препарат вынимали и сушили под вытяжкой. Выделение фракций производили в 10% растворе фосфорномолибденовой кислоты в этаноле. После термостатирования при 100—120 °С хроматографические зоны проявлялись в виде темных пятен на светлом фоне. Идентификацию пятен проводили по установленным в работе [2] значениям R_f . Профили зон получали построением значений яркости изображений

хроматограмм.

Результаты и обсуждение. Все исследованные масла имели хроматографические профили, сходные представленным на рис. 1.

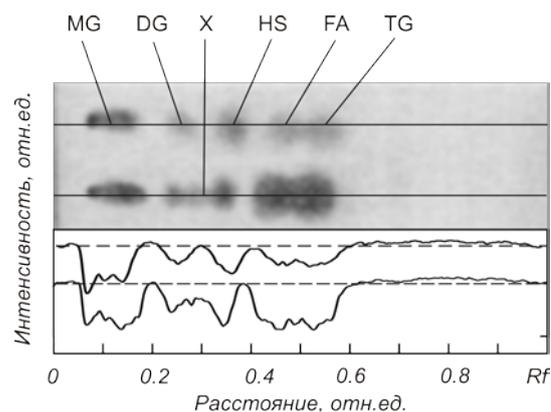


Рис. 1. Хроматографические профили свежего (вверху) и отработанного (внизу) льняного масла

На образцах свежих масел можно выделить пять хроматографических зон, которые в соответствии с [2] идентифицируются как моно- (MG) и диалкилглицериды (DG), жирные кислоты (FA), высшие спирты (HS) и триглицериды (TG). Площади зон зависят от вида масла. Пятна фракций деления масел после триботехнических испытаний находятся в тех же R_f координатах, но характеризуются другими площадями и интенсивностью. В частности, увеличиваются доли MG и DG. Появляется новая фаза X, которая идентифицируется как глицерин, наличие которого свидетельствует о процессах гидролиза. Высокмолекулярные соединения не обнаружены, что объясняется, скорее всего, их малой наработкой из-за ограниченного времени испытаний.

Выводы. Метод тонкослойной хроматографии позволяет оценить наличие основных химических соединений в растительных смазках и обнаружить изменения их состава и концентрации при трении.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т17-053).

1. Чечета О.В., Сафонова Е.Ф., Сливкин А.И. Идентификация растительных масел и масляных экстрактов методом ТСХ // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2008 (8), № 4, 649—653
2. Лобаева Т.А. Тонкослойная хроматография липидов, входящих в состав фитопрепаратов на основе жирных растительных масел // Вестн. РУДН, сер. Мед. — 2013, № 4, 21—23

NI-P ПОКРЫТИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Д.М. Гуцев¹, Л.Ф. Иванов¹, Е.Э. Дмитриченко², А.Я. Григорьев¹

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; Gucevd@mail.ru

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

Введение. Применение антифрикционных материалов в высокоскоростных узлах трения на основе самосмазывающихся твердых веществ затруднено из-за высоких требований к чистоте и точности обработки поверхностей трения [1]. Кроме того, износостойкость твердых смазок, как правило, невелика, а сохранение зазора постоянным для подшипников с газовой смазкой очень важно.

Решением проблемы является создание композиционных многослойных покрытий, в которых один из слоев (основа) обеспечивает необходимую эксплуатационную прочность и стабильность размеров, следующий слой (либо слои) придают поверхности высокую износостойкость и снижают значение коэффициента трения.

Цель работы — проверка износостойкости покрытий Ni-P+SiO₂, Ni-P+MoS₂, Ni-P+SiO₂+PTFE, Ni-P+MoS₂+PTFE, Ni-P+PTFE, на элементах радиальных лепестковых газодинамических подшипников (ГДП) в условиях, моделирующих режим пуск-остановка. Долговечность работы ГДП определяется, как правило, количеством циклов пуск-остановка, при котором момент трогания, обусловленный статическим трением, постепенно возрастая, достигает предельного значения момента электродвигателя прибора [2].

Материалы и методы. В качестве деталей лепестковых ГДП использован сплав прецизионный с заданными свойствами упругости марки 36НХТЮ, применяемый для упругих чувствительных элементов, работающих при температуре до 250 °С. Для ГДП турбогенератора МГД-20-01, экспериментально установлены окружная скорость, при которой происходит всплытие $V_{вспл} = 10 \dots 15$ м/с, что соответствует 3000 об/мин при диаметре цапфы 50 мм, время всплытия $T_{вспл} = 1$ сек.

Элементы ГДП испытывались на стенде для испытаний подшипников П-004.02.000 (рис. 1).

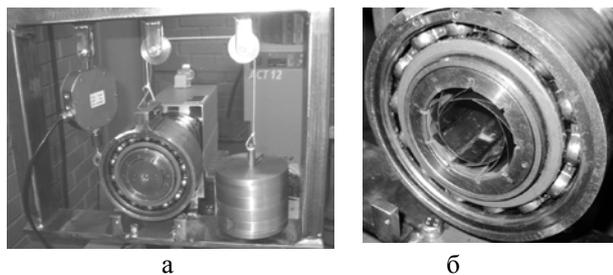


Рис. 1. Внешний вид испытательного стенда: а — стенд ускоренных испытаний, б — газодинамический радиальный подшипник (внутри подшипника качения)

Испытания заключались в последовательных 90 секундных циклах запусках-остановках стенда с регистрацией момента трения. На основании полученных данных строились графики зависимости момента трения от времени (рис. 2).

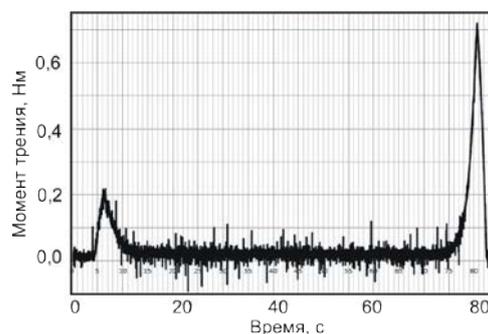


Рис. 2. Изменение момента трения в одном цикле испытаний без нагрузки (покрытие Ni-P+SiO₂)

Работоспособность антифрикционных покрытий оценивалась по значениям момента трения при разгоне, выходе на газодинамический режим работы и при торможении, а также температуры в зоне контакта. Критерием потери работоспособности покрытия являлся выход контролируемых параметров за пределы допустимых по техническому заданию значений. За стойкость покрытия принимали количество рабочих циклов пуска-остановка до потери покрытием работоспособности (табл. 1).

Таблица 1. Количество циклов пуск-остановка стенда с исследуемыми покрытиями

Тип покрытия	Количество циклов пуск-остановка осуществленных под нагрузкой
Ni-P+SiO ₂	30
Ni-P+MoS ₂	32
Ni-P+SiO ₂ +PTFE	100
Ni-P+MoS ₂ +PTFE	28
Ni-P+PTFE	420

В результате испытаний установлено, что элементы ГДП с покрытиями Ni-P+SiO₂+PTFE и Ni-P+PTFE обеспечивают наибольшее количество циклов пуск-остановка под нагрузкой, что позволяет рекомендовать их к практическому использованию.

1. Пинегин С.В. Развитие и внедрение опор с газовой смазкой — важное направление технического прогресса // Вестн. Машиностроения. — 1970, № 10, 3—8
2. Брагин А.Н., Панфилов Е.А. Высокоскоростные подшипники скольжения с газовой смазкой: обзор. — М.: МАИ. — 1966

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ НА ЕЕ МЕХАНИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ

В.И. Жорник¹, А.В. Ивахник^{1,2}, В.П. Ивахник¹, А.В. Запольский²

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; zhornik@inmash.bas-net.by

²ООО «Евразия Лубрикантс», Заславль, Беларусь

Качество пластичных смазок характеризуется комплексом механических и физико-химических свойств, к числу которых относится механическая стабильность, отражающая тиксотропные свойства смазки. Тиксотропные свойства пластичных смазок в значительной степени определяются структурой их дисперсной фазы (ДФ).

В настоящей работе исследована взаимосвязь структуры ДФ пластичных смазок с их механической стабильностью на примере комплексной литиевой (*kLi*-) смазки ИТМОЛ-150 (ТУ РБ 100029077.005-2006), комплексной кальциевой (*kCa*-) смазки БИНОЛ-180 (ТУ РБ 100029077.007-2006) и комплексной сульфат кальциевой (*kSulCa*-) смазки OIMOL KSC WR 2 (ТУ РБ 190410065.017-2014). При этом механическая стабильность смазок оценивалась по изменению показателя пенетрации P в соответствии с методикой ASTM D 217.

В исходном состоянии строение ДФ *kLi*- и *kCa*-смазок представляют собой совокупность переплетенных волокон (рис. 1, *a*) или стержней (рис. 1, *б*), которые в зоне трибоконтакта под воздействием прикладываемой нагрузки с течением времени претерпевают необратимые изменения либо агрегируясь в комкообразные хлопья (для *kLi*-смазки) (рис. 1, *з*), либо измельчаясь в короткие элементы (для *kCa*-смазки) (рис. 1, *д*). При этом наблюдается разрушение как дисперсионной (связи между волокнами или стержнями), так и кристаллизационной (связи внутри волокон и стержней) структуры дисперсной фазы пластичных смазок [1]. В результате подобной деградации дисперсной фазы теряется ее загущающая способность, ухудшается коллоидная стабильность, снижаются тиксотропные свойства смазки.

В результате испытаний для *kLi*-смазки показатель пенетрации от исходного значения $P_n = 265 \cdot 10^{-4}$ м (класс NLGI 2, консистенция по ISO 2137 — мягкая) через 100000 циклов нагружения возрастает на 95 ед. до значения $P_k = 360 \cdot 10^{-4}$ м, что соответствует классу NLGI 0 (консистенция ISO 2137 — полужидкая). Для *kCa*-смазки увеличение показателя пенетрации составляют 193 ед. (от $P_n = 270 \cdot 10^{-4}$ м до $P_k = 463 \cdot 10^{-4}$ м).

Структура дисперсной фазы *kSulCa*-смазки представляет собой совокупность единичных звездообразных мицелл, скрепленных в конгломераты в виде т.н. «ежиков» (рис. 1, *в*), которые объединены между собой за счет сил различного межмолекулярного взаимодействия в подвижный структурный

каркас.

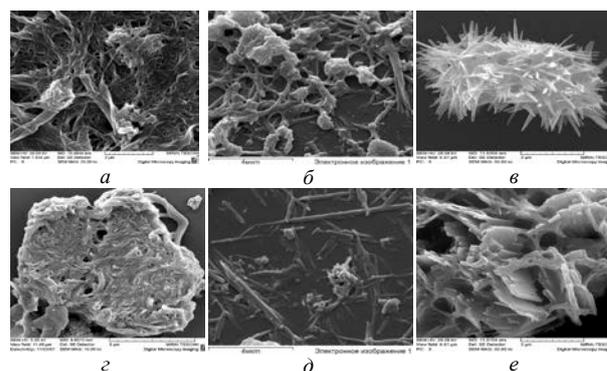


Рис. 1. Структура ДФ *kLi*- (*a*, *з*), *kCa*- (*б*, *д*) и *kSulCa*- (*в*, *е*) смазок до (*a*, *б*, *в*) и после (*з*, *д*, *е*) испытаний

Подобная форма подвижного каркаса дисперсной фазы обуславливает высокую адаптивность *kSulCa*-смазки к уровню механической нагруженности, что подтверждается результатами ее испытаний на механическую стабильность. В частности показано, что для этой смазки показатель пенетрации от исходного значения $P_n = 265 \cdot 10^{-4}$ м (класс NLGI 2, консистенция ISO 2137 — мягкая) через 100000 циклов нагружения изменяется только на 8 ед. ($P_k = 273 \cdot 10^{-4}$ м), что соответствует тому же классу NLGI 2.

Анализ структуры дисперсной фазы *kSulCa*-смазки после проведения испытаний показывает, что высокая степень ее разветвленности сохранилась (рис. 1, *е*), это позволяет обеспечивать высокое маслоудержание и характеризует повышенную механическую стабильность данной смазки.

В процессе трибовзаимодействия в *kSulCa*-смазке происходит разрушение только быстро восстанавливающейся тиксотропной компоненты структуры дисперсной фазы, в то время как у *kLi*- и *kCa*-смазок наряду с тиксотропной разрушается и кристаллизационная составляющая структуры ДФ, что обуславливает необратимые процессы деградации смазки, приводящие к потере ее качества.

Повышенная механическая стабильность *kSulCa*-смазки обуславливает перспективность ее применения в тяжело нагруженных и высокотемпературных узлах трения, а также в условиях действия ударных нагрузок.

1. Ваванов В.В., Вайншток В.В., Гуреев А.А. Автомобильные пластичные смазки. — М.: Транспорт. — 1986

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ПОЛИМЕР — ПОЛИМЕРНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян, А.Э. Багдасарян

Национальный политехнический университет, Ереван, Армения; ars.karapetyan@yahoo.com

Цель

Потребность и область применения антифрикционных полимерных материалов, способных работать в полимер-полимерных трибосопряжениях без смазки приобретает актуальное значение для повышения качества, надежности и долговечности машин, устройств и приборов. Наиболее распространенными примерами применения антифрикционных полимерных материалов является их использование в качестве материалов для изготовления микроподшипников скольжения (втулки, валики), мелко-модульных зубчатых передач, а также направляющих скольжения и т.д. Конструкторы, применяющие пары полимер-полимер в узлах трения иногда затрудняются в решении какие из выпускаемых полимерных материалов целесообразно применять в каждом конкретном случае исходя из скоростных и нагрузочных режимов эксплуатации, требований к точности сопряжения, габаритов и конструктивного исполнения проектируемых узлов. В целях оптимального выбора материалов для полимер-полимер пар трения необходимо рассмотреть предъявляемые к ним основные требования. Указанные материалы должны обеспечивать высокую износостойкость и технологическую точность размеров деталей, стабильный и низкий коэффициент трения, достаточную (статическую и циклическую) механическую прочность, теплостойкость и теплопроводность, химическую стойкость, надежность и долговечность сопряжения, а также они не должны быть дефицитными, дорогими, токсичными [1—5].

Настоящая работа посвящена обоснованию оптимального выбора антифрикционных полимерных материалов при конструировании и изготовлении полимер — полимерных узлов трения.

Материалы и методы

Для исследований были использованы различные по физико-механическим свойствам, химическому составу и строению антифрикционные полимерные материалы, такие как полиацетаты, полиамиды, полиимиды, полифениленоксид, поликарбонат, АБС пластики, находящие широкое применение в полимер-полимерных трибосопряжениях. Трибологические свойства материалов оценивались на машине трения СМТ-1 по схеме “вал—частичный вкладыш”, при скоростях от 0,25 до 2,0 м/с и в диа-

пазоне нагрузок от 0,1 до 3,0 МПа.

Результаты и обсуждение

На основании результатов трибологических исследований антифрикционных полимерных материалов предложена схема выбора оптимальных пар трения для полимер — полимерных пар трения, дающих возможность до их конструирования определить какие полимерные сопряжения дают низкий износ и коэффициент трения, а какие — большие. Это очень важно для конструкторов, проектирующих полимер — полимерные пары трения, работающие в режиме самосмазывания.

Представлен также блок схемы выбора оптимальных полимерных материалов при конструировании и изготовлении полимер — полимерных пар трения, в котором обобщены технологические, эксплуатационные, экономические и экологические требования к полимерным материалам, а также методы изготовления пары трения из различных полимерных материалов. Проведенные исследования расширяют наши представления в вопросах выбора материалов при конструировании и изготовлении полимер — полимерных пар трения.

Заключение

Разработка блок схемы выбора оптимальных полимерных материалов при конструировании и изготовлении микроподшипников скольжения, мелко-модульных зубчатых передач или направляющих скольжения позволяет осуществить обоснованный выбор трибоматериалов в условиях трения без смазки и прогнозировать их работоспособность и износостойкость.

1. Белый В.А., Свириденко А.И. и др. Трение и износ материалов на основе полимеров. — Минск: Наука и техника. — 1976
2. Полимеры в узлах трения машин и механизмов: Справочник/ Под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 1980.- 208с.
3. Rymuza Z. Tribology of Miniature Systems. — Elsevier, Amsterdam. — 1989
4. Трибология: Исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. — М.: Машиностроение. — 1993
5. Карапетян А.Н., Рымуза З., Кушниревич З. Трибологические свойства полимер-полимерных пар // Трение и износ. — 2004 (25), № 3, 292—305

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.М. Крижевский¹, Т.А. Ахметов²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; davlenec@gmail.com

²ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Беларусь

Введение. Основное назначение тормозных устройств — это диссипация механической энергии. До 95% диссипируемой механической энергии преобразуется в тепло, локализованное на фрикционном контакте. Для эффективного теплоотвода и снижения тепловой нагруженности узла трения во фрикционные композиты вводят различные теплопроводящие наполнители, например, металлы и их соединения.

Цель работы — исследовать влияние металлических наполнителей на теплофизические и триботехнические свойства фрикционных материалов.

Материалы и методы. Исследовались фрикционные композиты на основе фенолформальдегидных смол, содержащие в том числе дисперсные и волокнистые металлические наполнители. В качестве металлических наполнителей использовались порошки меди и вольфрамокобальтового сплава (ВК6), никелированной латуни, сплав Fe-B и ВК6 с добавлением бронзы, а также частицы крупной фракции сплава ВК6 и меди. Содержание металлических наполнителей в составах фрикционных композитов составляло 15% по массе.

Триботехнические испытания проводились на машине трения И-32, схема испытаний «вращающийся диск — неподвижный индентор». Испытания образцов проводились без смазочного материала. Режим испытаний на машине трения: давление на фрикционном контакте 0,27 МПа, линейная скорость скольжения 7,25 м/с, длительность испытания 260 мин.

Исследование теплофизических свойств проводилось с использованием прибора LFA 447 NanoFlash (NETZSCH). В качестве образцов использовались цилиндры диаметром 25,4 мм и толщиной 1,5 мм, изготовленные методом горячего прессования.

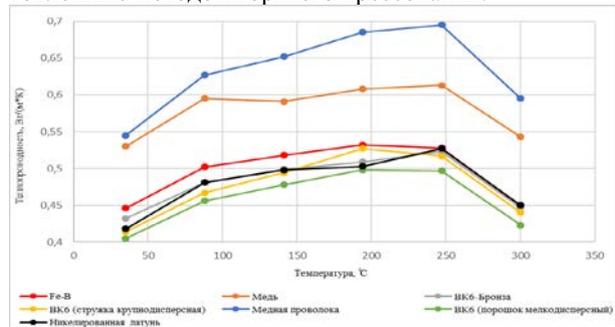


Рис. 1. Зависимость теплопроводности фрикционных композитов от температуры

Результаты и обсуждение. На рис. 1, 2 приве-

дены результаты определения теплофизических свойств исследуемых составов фрикционных композитов, к числу которых относятся удельная теплоемкость и теплопроводность.

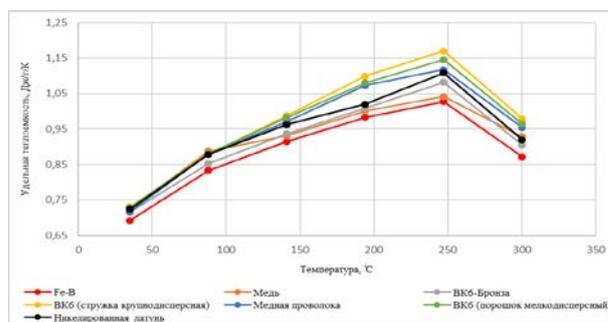


Рис. 2. Зависимость удельной теплоемкости фрикционных композитов от температуры

На рис. 3 показана установленная зависимость коэффициента трения от времени испытаний.

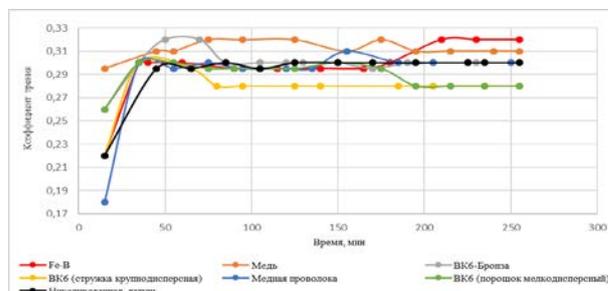


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от времени испытаний

Заключение. Экспериментально определены зависимости теплопроводности и удельной теплоемкости фрикционных материалов от вида металлических наполнителей. Учитывая, что фрикционные композиционные материалы, как правило, содержат 10 и более компонентов, среди которых широко используются такие как стеклоровинг, базальтовое волокно и т.п., обладающие высокой теплоемкостью, то основной задачей является обеспечение высокой теплопроводности композита. Следовательно, использование крупнодисперсных металлических наполнителей с высоким коэффициентом теплопроводности будет оптимальным с точки зрения снижения тепловой нагруженности тормозного узла.

- Сергиенко В.П., Бухаров С.Н., Купреев А.В. Вибрация и шум в тормозных системах мобильных машин. Часть 1. Экспериментальные методы исследования // Трение и износ. — 2008 (29), № 3, 306—314

ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ “ТРУБА—ДИСТАНЦИОНИРУЮЩАЯ ГРЕБЁНКА” ПАРОГЕНЕРАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В.В. Лемехов¹, В.Д. Сизарёв¹, С.В. Столотнюк¹, Ю.В. Лемехов¹, Б.Я. Сачек²,
А.М. Мезрин², Т.И. Муравьёва², И.А. Солдатенков², С.В. Васильев³

¹ АО «НИКИЭТ»,

² ИПМех РАН, Москва, Россия,

³ ПАО «ЗИО», Подольск

Одним из предполагаемых нарушений нормального функционирования парогенераторов (ПГ) реакторной установки со свинцовым теплоносителем в условиях длительной эксплуатации является разгерметизация теплообменных труб. Наиболее вероятное место нарушения целостности труб находится в зонах сопряжения труб с дистанционирующими элементами. При поперечном обтекании пучка витых теплообменных труб ПГ теплоносителем априори возникают колебательные процессы труб и их взаимные перемещения относительно дистанционирующих элементов. Колебательное движение труб в условиях воздействия свинцового теплоносителя предопределяет необходимость изучения закономерностей процессов фреттинг изнашивания материала труб. Основная цель данной работы заключается в проведении оценки долговечности труб парогенератора, базирующихся на результатах стендовых испытаний, выполненных в условиях макси-

мально приближенных к натурным, в частности, с соблюдением требований идентичности теплотехнических свойств теплоносителя, использовании тех же материалов и конструктивных особенностей трибосопряжений. Для решения этой задачи была разработана специальная трибологическая установка, обеспечивающая выполнение заданных требований. Дается краткое описание конструктивных особенностей установки, которая обеспечивает возможность испытаний трибосопряжений всех трёх возможных типов контактного взаимодействия: точечного, линейного, конформного. Выполнен ряд экспериментов для различных значений параметров виброскоростного режима нагружения. Получены экспериментальные данные, служащие основой математического моделирования процессов фреттинг изнашивания и расчетного прогнозирования ресурсных характеристик теплообменных труб ПГ в условиях нормального функционирования.

ФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛОВ АРМЯНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Н.Г. Меликсетян

Национальный политехнический университет Армении, Ереван n_meliksetyan@mail.ru

Введение. Комплексный анализ и обобщение результатов исследований в направлении изучения процессов высокотемпературного фрикционного взаимодействия материалов пар трения тормозных устройств выявили основной механизм трения и изнашивания и открыли перспективы для создания работоспособных и экологически безвредных фрикционных материалов с заданными фрикционно-износными параметрами и управляемыми свойствами [1, 2].

Установлено, что в условиях высокотемпературного изнашивания разрушение поверхностных слоев фрикционных материалов протекает в многостадийном режиме механохимических превращений, происходит ориентация рабочего слоя по направлению вектора пути скольжения, на поверхности трения образуются вторичные структуры второго типа и пара трения работает в сложном агрегатном состоянии. Образовавшиеся продукты износа имеют форму тонких лепестков с неровным рельефом поверхности и представляют собой конгломерат включений с наличием реакционно-способных и химически активных свободных радикалов. Фрикционное взаимодействие сопровождается образованием на поверхности трения контртела пленки фрикционного переноса, существенно влияющего на работоспособность пары трения и механизм изнашивания ФАПМ согласуется с усталостным и деламинационным теориями изнашивания твердых тел.

Цель — разработка новых износостойких и высокоэффективных фрикционных безасбестовых тормозных материалов на основе армирующих волокон из минералов армянского месторождения с заранее заданными и управляемыми фрикционно-износными свойствами. За основу принимать регулирование температурных режимов протекающих во фрикционном контакте механохимических превращений.

Результаты и обсуждение. В результате исследований были разработаны и защищены авторскими свидетельствами и патентами РФ и РА новые фрикционные безасбестовые полимерные материалы под общим названием Бастенит на основе армирующих волокон из минералов армянского месторождения (базальтовые и стеклянные волокна), комбинированных связующих (фенолформальдегидные

смолы, каучуки) и фрикционных добавок. Их разработка была осуществлена с регулированием характера протекания механохимических превращений во фрикционном контакте, а именно, перемещением в область более высоких температур процесса протекания третьего этапа механохимических превращений (деструкция армирующих наполнителей) путем применения в композиционном составе фиксированного процентного содержания смеси базальтовых и стеклянных волокон и определенных фрикционных добавок.

При использовании базальтовых волокон, полученные из горного минерала армянского месторождения, взамен асбеста в составе фрикционных материалов тормозных устройств, положительный технический эффект заключается в стабилизации тормозных характеристик фрикционной пары, повышении износостойкости и коэффициента трения фрикционных материалов, а также эффективности торможения в целом. Подтверждается возможность создания новых фрикционных материалов с заданными фрикционно-износными параметрами и управляемыми свойствами регулированием протекающих механохимических и структурных изменений, их смещением в область более высоких температур с помощью ввода в композиционный состав разрабатываемого материала базальтовых волокон и специальных наполнителей.

По износостойкости, эффективности торможения, потери и восстанавливаемости эффективности торможения разработанные материалы удовлетворяют требованиям международных стандартов. Значения эффективности торможения укладываются в зону 15%-го допуска стандартов, а показатели восстанавливаемости торможения не отличаются от нормативных показателей. При нагревном цикле разброс значений тормозного момента не превышает 15%.

1. Погосян А.К., Сысоев П.В., Меликсетян Н.Г. и др. Фрикционные композиты на основе полимеров. — Мн.: Информт-рибо. — 1992
2. Pogosian A.K. and Meliksetyan N.G. Research of High-temperature Wear Products for Brake Materials. Proceedings of the 8th International Symposium on Friction Products and Materials. — Yaroslavl: Russia, 2010. — 2010, 126—138

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ ИЗ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО И МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

А.В. Рогачев¹, А.С. Руденков¹, Д.Г. Пилипцов¹, Сянь Хун Джанг², Н.Н. Федосенко¹

Международная Китайско-Белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь, rudenkov@gsu.by

²Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин, Китай

Введение. Легированные углеродные покрытия являются сложными объектами, физико-химические и механические свойства которых определяются режимами и условиями формирования, природой отдельных ингредиентов, характером распределения фаз в объеме матрицы, межфазными процессами [1—3]. При формировании покрытий из импульсной углеродной катодной плазмы легирование металлами осуществляется, как правило, путем их электродугового испарения [3]. И хотя при этом предпринимаются меры по сепарации генерируемых потоков, полностью исключить наличие в нем капельной фазы невозможно. Химическое взаимодействие углерода с атомами и ионами металла осуществляется на границе капельной фазы, что приводит к структурной неоднородности и неравномерному распределению механических свойств покрытия, что, в свою очередь, может способствовать абразивному изнашиванию поверхности контртела при работе в паре трения с такими покрытиями

Цель работы — изучение влияния режимов и условий легирования на морфологию и триботехнические свойства композиционных металл-углеродных покрытий.

Триботехнические испытания проводились по схеме «сфера — плоскость» (шарик радиусом 5 мм из закаленной стали ШХ15, покрытие нанесли на кремниевую подложку). Нагрузка равнялась 0,98 Н, средняя скорость перемещения — 0,01 м/с. Затем выполнялся расчёт коэффициента объёмного изнашивания по формуле:

$$j = V/F L [m^3/(Н·м)], \quad (1)$$

где F — нагрузка (Н); L — путь трения (м); V — объем шарового сегмента изношенного материала (m^3).

Из анализа результатов атомно-силовой микроскопии следует, что при аналогичных концентрациях субшероховатость R_{ms} покрытий, легированных медью с использованием магнетронного распыления, ниже в 2 раза, а легированных титаном, в 4,9 раза, чем при электродуговом испарении указанных металлов. Результаты анализа спектров комбинационного рассеяния показывают, что углеродные покрытия, легированные при помощи магнетрона, характеризуются меньшей шириной G-пика и большим значением соотношения I_D/I_G , а значит более высокой степенью упорядоченности и меньшим размером sp^2 -кластеров, чем в случае электродугового испарения.

Установлено, что в общем случае, независимо от выбора способа допирования, коэффициент трения композиционных углеродных покрытий увеличивается с ростом концентрации легирующего металла. Данное наблюдение согласуется с результатами, представленными в работах [4, 5]. Коэффициент объёмного изнашивания контртела при взаимодействии с покрытиями, легированными титаном при помощи магнетрона, в 4,3 раза меньше, чем в случае покрытий, легированных с использованием электродугового испарения, что достигается путем применения предельно диспергированных потоков ионов и атомов металла, отсутствием капельной фазы. Кроме того, покрытия легированные методом магнетронного распыления, согласно данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, характеризуются более высоким содержанием sp^2 -гибридизированных атомов углерода. В процессе трения формируется так называемый слой переноса [4], состоящий в основном из графита, который выступает в роли твердой смазки. Графит намазывается на поверхность контртела, предохраняя тем самым ее от изнашивания.

Таким образом, легирование углеродных покрытий путем распыления металлов магнетроном, в сравнении с покрытиями, легированными методом электродугового испарения, позволяет уменьшить коэффициент объёмного изнашивания контртела за счет отсутствия капельной фазы в потоке металлической плазмы, уменьшения субшероховатости поверхности, более высокого содержания упорядоченных sp^2 -кластеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках задания 4.1.02 ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии».

1. Grill A. Tribology of Diamond-Like Carbon and Related Materials: an Updated Review // Surface and Coatings Technology. — 1997 (95), 507—513
2. Donnet C., Erdemir A. Tribology of Diamond-like Carbon Films: Fundamentals and Applications. — Springer Science & Business Media. — 2007
3. Рогачев А.В. Триботехнические свойства композиционных покрытий, осаждаемых вакуумно-плазменными методами // Трение и износ. — 2008 (29), № 3, 285—292
4. Grill A. Review of the tribology of diamond-like carbon // Wear. — 1993 (168), 143—153
5. Zou C.W. Effects of Cr Concentrations on the Microstructure, Hardness, and Temperature-Dependent Tribological Properties of Cr-DLC Coatings // Applied Surface Science. — 2013 (286), 137—141

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ЛЕГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОМ

Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; amezrin@rambler.ru

Введение

Алюминиевые антифрикционные сплавы, широко используемые взамен бронз и баббитов при производстве монолитных подшипников скольжения, постоянно совершенствуются в плане оптимизации их механических (конструкционная и усталостная прочность, твёрдость) и триботехнических (задиристость, износостойкость, прирабатываемость) свойств путём их целевого комплексного легирования [1]. В качестве общепринятого эталона для сравнения используется обычно бронза БрО4Ц4С17. По результатам триботехнических испытаний ряда экспериментальных сплавов в качестве заменителей были предложен ряд сплавов с общей основой (Al+6%Sn+5%Si+4%Cu) и вариацией добавок свинца и висмута в пределах 2%. Их механические свойства оказались примерно вдвое выше, чем бронзы.

Цель работы — исследование влияния легирования железом опытных алюминиевых антифрикционных сплавов на их триботехнические характеристики.

Материалы и методы исследований

В качестве исследуемого материала были выбран экспериментальный алюминиевый сплав № 15 основе композиции Al–6%Sn–5%Si–4%Cu с содержанием железа около 1% и наличием свинца и висмута. Для сравнения были выбраны марочные сплавы АО3-7, АК5М4 и АМ5, а также в качестве эталона подшипниковая бронза марки БрО4Ц4С17.

Триботехнические испытания проводились в два этапа по отработанной методике [2]. На первом этапе проводились склерометрические испытания на триботестере UMT-3 фирмы CETR путём плавного внедрения сферического индентора при его перемещении относительно плоской поверхности образца с одновременной непрерывной регистрацией как нормальных, так и сдвиговых усилий. Испытания на износ проводились на триботестере Т-05 по схеме «вал-частичный вкладыш» с постоянной скоростью скольжения $V = 1$ м/с с варьированием нагрузки для обеспечения среднего контактного давления в диапазоне $P = 0,5 \dots 5$ МПа.

Результаты исследований

Предварительные склерометрические испытания исследуемых сплавов (см. рис. 1) показали, что сдвиговое сопротивление τ у всех сплавов примерно одинаковое и больше чем у бронзы. Наибольшее значение напряжения микрорезания $\sigma_{\text{мкр}}$ имеют сплавы № 15 и АО3-7, примерно в два раза превосходящее бронзовые.

Испытания на износ без смазки (см. рис. 2) показали, что в диапазоне давлений 0,5–1 МПа все

исследуемые сплавы по износостойкости превосходили эталонную бронзу. Однако, при давлениях выше 1 МПа не выдерживали нагрузки, за исключением сплава с содержанием железа (№ 15), который держал нагрузку вплоть до 3,2 МПа. В среднем в этом интервале давлений по интенсивности изнашивания экспериментальный сплав № 15 лучше эталонной бронзы на пол порядка.

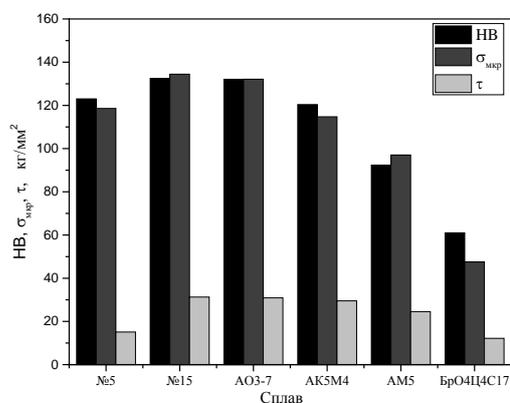


Рис. 1. Соотношение твёрдости HB, напряжения микрорезания $\sigma_{\text{мкр}}$ и сдвигового сопротивления τ исследуемых сплавов.

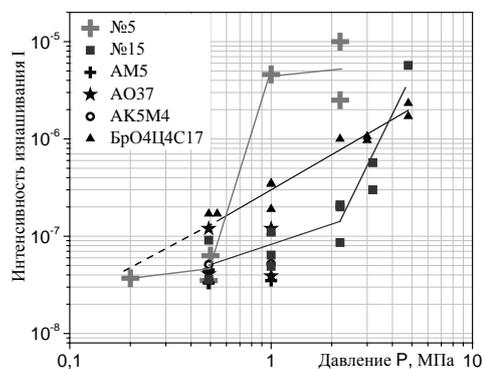


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания исследуемых сплавов от контактного давления при трении всухую.

По совокупности триботехнических свойств, полученных из первого и второго этапа экспериментальных исследований, наиболее предпочтительным для замены бронзы является сплав №15.

Благодарности. Работа проведена при поддержке Гранта РФФ 14-19-01033.

- Белов Н.А. и др. Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения / под ред. А.Е. Миронова, Н.А. Белова, О.О. Столяровой. — М.: Изд. Дом МИСиС. — 2016
- Сачек Б.Я., Мезрин А. М., Муравьёва Т.И., Столярова О.О., Комплексная экспресс-оценка триботехнических свойств антифрикционных алюминиевых сплавов методом склерометрии // Трение и износ. — 2016 (37), № 5, 606—613

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННЫХ НАКЛАДОК

В.П. Сергиенко, И.Ю. Симолюк, А.С. Тулейко

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
ilya_simonuk@mail.ru

Объектом исследования служили тормозные накладки дискового тормоза буровой установки Drillmec 1500HP разработанные и изготовленные в ИММС НАН Беларуси (рис. 1). Исследования включали климатические испытания, циклические низкотемпературные воздействия и высокотемпературный нагрев.



Рис. 1. Внешний вид тормозных накладок

Климатические испытания проводили в камере циклической коррозии (солевой туман). Образцы накладок тормозных выдерживались в течение 72 часов в камере циклической коррозии при температуре 35 ± 2 °С. Солевой туман согласно ASTM В368 — 5% раствор NaCl в дистиллированной воде с добавлением дигидрата хлорида меди.

Испытания тормозных накладок в низкотемпературном морозильнике включали пять циклов охлаждения до температуры -70 °С, выдержку при этой температуре (4 цикла по 24 часа, 1 цикл — 72 часа) и подъем температуры до комнатной 22 ± 2 °С после каждого цикла охлаждения.

Установлено, что образцы после климатических испытаний не содержали каких-либо дефектов структуры фрикционного материала и клеевого соединения накладки с металлической основой. Часть открытой поверхности металлической основы (каркаса) накладки тормозной была подвергнута коррозионному поражению, при этом изменений массы и толщины металлической основы не наблюдалось. На шлифованной поверхности фрикционной накладки появилась питтинговая (точечная) коррозия, являющаяся локальным видом коррозии металлического наполнителя фрикционного материала, при протекании которой разрушение сосредотачивается в отдельных дискретных областях на поверхности (точках выхода металлического наполнителя на поверхность).

Установлено, что фрикционный материал и

клеевое соединение никаких дефектов (отслоений, трещин, разрыхлений и т.д.) не содержит. Таким образом, циклические низкотемпературные нагрузки при отсутствии внешних силовых воздействий не привели к растрескиванию или отслоению фрикционных накладок. Далее тормозные накладки подвергали многоцикловому нагружению сжатием. На универсальной испытательной машине УММ-10 накладки устанавливали металлическим основанием на плоскую металлическую плиту и сжимали усилием $5 \cdot 10^3$ кгс. Количество циклов сжатия — 10. После испытаний никаких повреждений при визуальном осмотре не обнаружено.

Влияние высоких температур на прочность фрикционной накладки, металлического основания и клеевого соединения исследовали в термошкафу SNOL 180/400 при 400°С. После нагрева внешний вид тормозных накладок изменился, металлические основания приобрели черно-фиолетовый оттенок. Фиксирующие штифты стали подвижными. Клеевой состав частично деструктировал. Фрикционная накладка деформировалась с двух сторон (2—2,5 мм), и приняла параболическую форму. Металлическое основание также деформировалось на 0,7—1,0 мм при остывании на воздухе и на 1,0—1,5 мм после термического удара при резком охлаждении в воде (рис. 2).

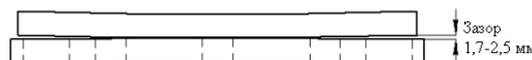


Рис. 2. Характер деформации тормозной накладки после воздействия высокой температуры

Выводы. В результате выполненных экспериментов установлено, что воздействие температур свыше 350 °С приводит к тепловой деформации как фрикционной накладки, так и металлического основания. Моделирование деформационных процессов в тормозных накладках показало, что при продольных деформациях свыше 0,7 мм на торцах металлического основания происходит разрыв клеевого соединения накладки с металлической основой. Фрикционно-износные характеристики материала фрикционной накладки не изменились.

1. Плескачевский Ю.М., Сергиенко В.П. Фрикционные материалы с полимерной матрицей: перспективы исследований, достигнутый уровень, рынок // Наука и инновации. — 2005, № 5(27), 46—53

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ СМЕСИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ДИГИДРОКВЕРЦЕТИНОМ

В.А. Соловьева¹, А.П. Краснов¹, Э.Е. Саид-Галиев¹, А.В. Наумкин¹, Н.С. Гаврюшенко²

¹Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия; naumkin@ineos.ac.ru

²ФГБУ «ЦИТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия

Большую часть узлов трения в эндопротезах суставов составляют пары сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)-металл. Основной проблемой современных полимерных имплантатов тазобедренных и других суставов является недостаточная продолжительность эксплуатации, обусловленная трибохимическими причинами, в связи с происходящими радикальными и трибоокислительными процессами. В связи с этим, стабилизация трибохимического взаимодействия этой пары СВМПЭ-сталь остается основной задачей трибологического и медицинского материаловедения. В ранее проведенных работах в качестве трибоингибирующей добавки стабилизирующей радикальные процессы был использован ингибитор дигидрокверцетин (ДГК). [1]

В последнее время было показано, что разработанная металл-полимерная система ДГК+Ag является более активным (в 1,5—2 раза) стабилизатором, по сравнению с ДГК. Модифицированный наночастицами серебра ДГК полностью стабилизирует низкотемпературное окисление СВМПЭ до температуры 280 °С.

Были исследованы трибологические свойства СВМПЭ с введенным в качестве трибохимического стабилизатора нанокompозитом ДГК — Ag.

Стабилизация процесса трения СВМПЭ модифицированного системой ДГК-Ag осложнена тенденциями, свойственными твердым функциональным наполнителям. При трении композитов СВМПЭ, модификатор ДГК-Ag, выступает в роли инородного твердого тела, как правило, ухудшающего самосмазываемость подобных материалов и, в то же время, как эффективный модификатор, способствующий ингибированию образующихся свободных радикалов.

Важным преимуществом разработанного материала (ДГК+Ag) перед ранее разработанными ингибиторами является практическое отсутствие адсорбированной воды, способствующей резкому ухудшению свойств СВМПЭ при переработке.

При исследовании трения композитов с постоянным количеством системы ДГК+Ag изменяли количество вводимого в неё серебра и судили о стабильности трения по размеру амплитуды колебаний коэффициента трения. Величина коэффициента трения в композитах изменялась незначительно, но амплитуда заметно возрастала при увеличении вводимого серебра.

В зависимости от количества вводимого серебра

ра в модификатор (ДГК + Ag) происходит значительное изменение трибологических показателей. При увеличении количества вводимого серебра с 1,5 до 5% происходит увеличение износа в 2 раза. Амплитуда колебания коэффициента трения увеличивается в 3 раза.

Важно отметить, что наряду со значительными изменениями износа, коэффициент трения сохраняет своё значение независимо от количества вводимого серебра. Возможно, на процесс трения модификатора влияет «островной» характер поверхности ДГК, на которой роль «островов» играют частицы Ag.

Трибологические испытания были проведены в специализированной организации — ЦИТО им. Н.Н. Приорова.

Образцы подвергали испытаниям при малых нагрузках на прецизионной машине трения Т-50. В выбранном рецептурном интервале, композиции показывают близкое значение коэффициентов трения (см. рис.). При этом, в период каждого цикла происходит постепенное понижение коэффициента трения (с 0,1 до 0,06).

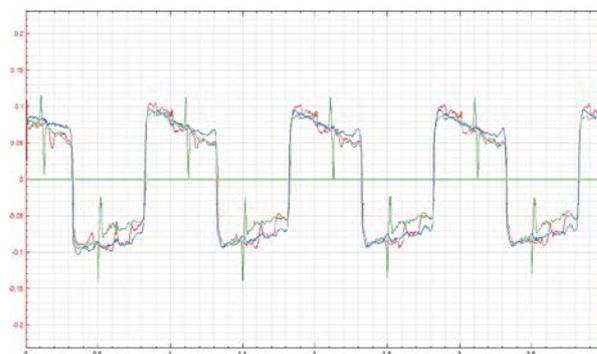


Рис. Коэффициенты трения СВМПЭ и двух композитов с (ДГК) и (ДГК-Ag)

Таким образом трибологические испытания серии полученных изделий, проведенные в специализированной организации ЦИТО показали низкие коэффициенты трения (~ 0,1) и повышенную износостойкость нанокompозитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ОХНМ IV.5.7

1. Краснов А.П., Тихонов Н.Н., Наумкин А.В., Гаврюшенко Н.С. Трибохимическое поведение СВМПЭ и его нанопористого аналога модифицированных α -токоферолом // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2012, № 4, 12—17

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ

О.О. Щербакова, Т.И. Муравьёва, Д.Л. Загорский, Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; shcherbakova@mail.ru

Введение и цель работы. Для большинства конструкций в машиностроении большое значение имеют материалы, используемые в трущихся деталях, в частности в подшипниках скольжения. Их надёжность, срок службы и стоимость зависят в первую очередь от правильного, научно обоснованного выбора материалов. Известно, что для изготовления подшипниковых материалов чаще всего применяются сплавы, в основном на основе меди (например, бронзы). Эти сплавы являются дорогостоящими, вследствие чего актуальной задачей представляется создание более дешёвых и стойких материалов. Одним из типов таких материалов являются сплавы на основе алюминия — они обладают сопоставимыми (с бронзой) антифрикционными характеристиками и в то же время являются более дешёвыми и доступными [1, 2]. Создание антифрикционных алюминиевых композиций, содержащих в своём составе железо, позволит получать сплавы, используя более дешёвые материалы и отходы собственного производства, что дополнительно снизит стоимость получаемой продукции.

Материалы и методы. В настоящей работе был исследован новый модельный сплав на основе композиции Al–6%Sn–5%Si–4%Cu с содержанием железа ок. 1% и наличием свинца и висмута.

Были проведены трибологические испытания образца сплава (по схеме «колодка—ролик») на трибометре Т-05 (материал ролика — сталь 45), с пошаговым изменением давления: 0,49, 1,0 и 2,2 МПа. Поверхности образцов (топография и состав) до и после испытаний исследовались на сканирующем электронном микроскопе FEI «QUANTA 650» с приставкой для элементного анализа EDAX.

Результаты и обсуждение. Исследования исходной структуры показали, что основой сплава является алюминиевая матрица, по границам зерен которой выделяются отдельные фазовые составляющие — фазы Si-Al, Θ -фаза и мягкая фаза Sn-Pb.

Показано, что после трибоиспытаний на поверхностях колодки и ролика произошло заметное изменение топографии и элементного состава. Так, на колодке было обнаружено образование продольных полос и каверн, свидетельствующих о деформации и частичном разрушении материала поверхности. Выявлено образование мелких светлых оксидных частиц округлой формы.

На Рисунке представлены СЭМ — изображения поверхности ролика после испытаний с мини-

мальным и максимальным давлением.

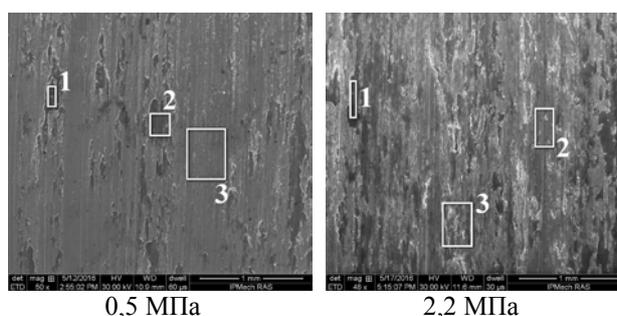


Рис. СЭМ-изображение поверхности ролика после трибоиспытаний при различных давлениях

Результаты рентгеноспектрального анализа поверхности стального ролика показаны в Таблице.

№ уч.	Установленный химический состав, мас. %							
	O	Al	Si	Sn	Fe	Cu	Pb	Bi
Давление 0,5 МПа								
1	21,6	49,9	2,3	2,7	20,6	2,3	0,4	0,2
2	14,9	49,5	1,8	2,1	29,4	2,0	0,2	0,1
3	4,2	5,2	0,1	0,1	89,7	0,3	0,2	0,2
Весь уч.	5,0	16,2	0,6	0,5	76,2	0,5	0,5	0,5
Давление 2,2 МПа								
1	12,4	59,6	3,5	2,9	17,6	2,8	0,7	0,5
2	2,9	7,8	0,2	0,2	87,7	0,5	0,1	0,6
3	9,5	37,4	1,3	1,5	47,6	1,4	0,7	0,6
Весь уч.	7,4	28,4	1,1	1,2	59,6	1,2	0,6	0,5

Видно, что на образце появились участки, химический состав которых соответствует материалу колодки. Это свидетельствует о процессе массопереноса химических элементов в зоне контакта, приводящему к образованию плёнки вторичных структур (ВС). Показано, что увеличение нагрузки на контактной паре приводит к изменению топографии поверхности ролика, что связано с утолщением пленки ВС. Последнее связано с увеличением количества перенесённого материала. Плёнка ВС защищает поверхность ролика в процессе трения.

Благодарности. Работа проведена при поддержке Гранта РФФИ 14-19-01033.

1. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Арзамасов Б.Н., Соловьёва Т.В., Герасимов С.А. и др.; Под ред. Арзамасова Б.Н., Соловьёвой Т.В. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н.Э. — 2005
2. Корочарова Е.Г., Миронов А.Е. Антифрикционные алюминиевые сплавы с повышенными свойствами // Литейное производство — 2011, № 10, 12—15

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

В.П. Бирюков¹, Д.Ю. Татаркин², Е.В. Хриптович², А.А. Фишков¹¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; laser-52@yandex.ru²ООО НТО «ИРЭ-Полус», г. Фрязино, Московской области, Россия

Введение. При лазерной наплавке происходит формирование наплавленного слоя с заданными свойствами за счет минимального коэффициента перемешивания наплавляемого материала с основой [1].

Цель работы — увеличение коэффициента использования присадочного порошкового материала и оптимизация режимов лазерной наплавки для повышения абразивной износостойкости, наплавленных покрытий.

Материалы и методы. Для экспериментов использовали универсальное оборудование ООО НТО «ИРЭ-Полус» содержащее волоконный лазер ЛС-5, робот КУКА, оптическую головку фирмы PRECITEC, технологический стол. В качестве наплавочных материалов были выбраны порошки на никелевой основе фирмы Хёгенас, Швеция и ОАО «ПОЛЕМА», г. Тула. Размер частиц порошка составлял 40—150 мкм. Мощность излучения варьировалась в пределах 1800—3800 Вт. Скорость перемещения оптической головки составляла 0,5—2 м/с в поперечном направлении и 1—15 мм/с, в продольном направлении. Лазерную наплавку предварительно насыпанного порошка с толщиной слоя производили на стальные плиты с размерами 140×140×20 мм. Образцы вырезали электроискровым методом размерами 25×70×20 мм. Металлографические исследования выполняли на микротвердомере ПМТ-3, металлографическом микроскопе Альтами МЕТ-1С. Испытание на абразивное изнашивание проводили на машине трения БХ-4 по модернизированной в ИМАШ РАН схеме Бринелля — Хаворта [2].

Результаты и обсуждение. Для отработки технологических режимов применяли порошок фирмы Хёгенас (заявленная твердость HRC 58) с различной толщиной насыпанного слоя 3—10 мм. Получены наплавленные слои толщиной 3—9 мм и шириной 20—80 мм за один проход руки робота.

При варьировании мощностью излучения, скоростью перемещения и диаметром лазерного луча, установлены закономерности изменения микротвердости в наплавленном слое в пределах 6120—12000 МПа. При высокой плотности энергии лазерного луча часть легирующих элементов и углерода выгорает и микротвердость понижается, появляются дефекты в виде пор. При низких значениях плотности энергии лазерного излучения происходит не полное сплавление порошкового материала с основой и снижается микротвердость. В результате проведенных исследований на абразивное изнашивание первой партии образцов найдены опти-

мальные режимы лазерной наплавки порошковых покрытий. Вторая партия образцов наплавлялась порошками различной твердости и обеих фирм производителей порошковых материалов. На рис. 1 представлена зависимость абразивного износа по схеме Бринелля-Хаворта от твердости наплавленного слоя и образцов стали 40Х. К вращающемуся резиновому диску образец прижимался нагрузкой 15 Н. Время испытаний составляло 10 минут. В качестве абразива использовали кварцевый песок с размером частиц 0,2—0,6 мм. Из приведенных данных следует, что наплавленные слои с твердостью HRC 58—61 (порошки фирмы Хёгенас-1 и ОАО «ПОЛЕМА» -2) по износостойкости в 10 раз выше, чем нормализованная сталь 40Х (HB180) и в 4,6 раза выше, чем улучшенная сталь 40Х (HB 250—270).

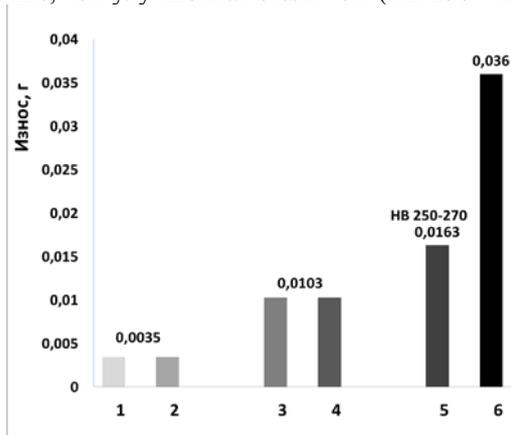


Рис. 1. Зависимость абразивного износа от твердости наплавленного слоя порошковыми материалами и образцов стали 40Х: 1 — Хёгенас, HRC 58—61; 2 — ОАО «ПОЛЕМА» HRC 58—61; 3 — Хёгенас, HRC 38—41; 4 — ОАО «ПОЛЕМА» HRC 38—41; 5 — сталь 40Х, HB 250—270; 6 — сталь 40Х, HB 180

Выводы:

1. Разработана технология лазерной наплавки порошковых материалов на основе никеля с шириной наплавленного слоя 20—80 мм и высотой валика 3—9 мм за один проход.

2. Проведенные испытания на абразивное изнашивание по схеме Бринелля-Хаворта показали повышение износостойкости наплавленных покрытий в 10 раз по сравнению с нормализованной сталью 40Х.

- Бирюков В.П., Лаптева В.Г., Хренникова И.А. и др. Восстановление лазерной наплавкой работоспособности пары трения вал — вкладыш подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2013, № 5, 91—95
- Хрущов М.М., Бабичев М.М. Абразивное изнашивание. — М.: Наука. — 1970

УЛУЧШЕНИЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ АВИАКЕРОСИНОВ С ПОМОЩЬЮ ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

А.К. Горюнова, Н.М. Лихтерова, К.В. Шаталов

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия; 25gosnihim@mil.ru

Введение. Противозносные свойства топлив для реактивных двигателей во многом определяют надежность работы топливной системы авиационного двигателя. Недостаточные противозносные свойства способствует засорению топливных фильтров и каналов форсунок, заеданию золотников регуляторов, выкрашиванию материалов деталей трущихся пар качающих узлов насосов.

В настоящее время производство отечественных топлив для реактивных двигателей, полученных гидрогенизационными процессами, включает стадию введения противозносной присадки, улучшающей смазывающую способность топлив.

Кроме того, вырабатывают авиационные топлива на основе керосиновых фракций гидрокрекинга вакуумных газойлей, что приводит к еще большему ухудшению смазывающей способности топлив по сравнению с топливами, вырабатываемыми на базе керосиновых фракции гидроочистки. По результатам предварительных исследований (данные ЦИАМ) было обнаружено появление нетипичного для авиакеросинов задира на поверхности шаров пар трения «шар—диск». Дополнительные исследования показали, что явление задира на поверхности шаров может быть устранено путем увеличения концентрации противозносной присадки до 0,0045 мас.% вместо 0,0035 мас.%.

Цель. Разработать отечественную противозносную присадку взамен присадки Хайтек-580 (США).

Материалы и методы. На первом этапе исследования были выбраны товарные образцы противозносных присадок, применяемых в составе среднестиллятных топлив — Хайтек-580, ДНК, Комплексал ЭКО Д, Колтек ДС 7739, а также опытные образцы присадок из растительного сырья — жирные кислоты таллового масла, дистиллированное талловое, сафлоровое и рапсовое масло и индивидуальные жирные кислоты — олеиновая и ее изомер — элаидиновая.

Результаты и обсуждение. Методом газовой хроматографии на газовом хроматографе HP 6890 с капиллярной колонкой HP-Innowax 30 м × 0,32 мм × 0,5 мкм и пламенно-ионизационным детектором по ГОСТ Р 55483-2013 «Определение жирно-кислотного состава методом газовой хроматографии» был изучен состав вышеуказанных присадок и показано, что основным компонентом в разных концентрациях являются полиненасыщен-

ные жирные кислоты C_{18} — C_{22} [1,2].

Исследуемые присадки были введены в рабочей концентрации 0,003 мас.% в гидроочищенную керосиновую фракцию, подвергнутую дополнительной адсорбционной очистке.

Испытание эффективности исследуемых присадок проводили на аппарате BOCLE 100 по ГОСТ Р 53715 «Топлива авиационные для газотурбинных двигателей. Метод определения смазывающей способности на аппарате шар—цилиндр (BOCLE)». Полученные данные показали, что опытные образцы присадок на основе жирных кислот растительного происхождения по своей эффективности не уступают товарным противозносным присадкам (диаметр пятна износа изменяется в пределах 0,48—0,58 мм, что соответствует значениям этого показателя для товарных топлив с присадкой Хайтек-580).

Кроме того, были проведены исследования, касающиеся влияния этих присадок на другие эксплуатационные свойства топлив, в частности, на термоокислительную стабильность (ТОС). Показано, что талловое масло, сафлоровое масло приводят к снижению температуры начала осадкообразования и увеличению индекса термостабильности, но, в целом, по ТОС образцы соответствуют нормам, предъявляемым авиационным горючим. Для исследования влияния образцов присадок на чистоту топлива определяли размеры и количество частиц по методу ASTM D 7619. Установлено, что все опытные противозносные присадки не оказывают отрицательного влияния на чистоту топлива. Топлива соответствуют 6—8 классам чистоты по ГОСТ 17216-2001.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что создание отечественной противозносной присадки возможно на базе продуктов переработки растительного сырья. Основным компонентом присадки будут являться ненасыщенные жирные кислоты C_{18} — C_{22} .

1. Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Куликовский А.В., Бабурина М.И., Горюнова А.К., Шаталов К.В., Лихтерова Н.М. Талловое масло из растительного сырья как перспективный компонент производства высокоэнергетических и противозносных продуктов // Сб. науч. тр. МХТД МГУЛ. — 2016, вып. 381, 104—107
2. Шаталов К.В., Горюнова А.К., Лихтерова Н.М., Иванкин А.Н., Бабурина М.И., Куликовский А.В. Применение продуктов сульфатцеллюлозного производства в качестве присадок к топливам реактивных двигателей // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. — 2016, № 6, 107—115

ПЛАЗМЕННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СПЛАВА Ti-6Al-4V

А.П. Ласковнев¹, Н.Н. Черенда², А.В. Басалай¹, В.В. Углов²,
В.И. Шиманский², В.М. Асташинский³, А.М. Кузьмицкий³¹ФТИ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; anna.basalay@mail.ru²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь³Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Сплав Ti-6Al-4V широко используется в медицине для изготовления дентальных и ортопедических имплантатов. Однако присутствие в составе сплава токсичных элементов V и Al может приводить к их накоплению в тканях вокруг имплантата и в организме в целом [1]. Данная проблема может быть решена с помощью поверхностного легирования изделий из данного сплава атомами биосовместимых элементов путем воздействия компрессионными плазменными потоками (КПП) на систему «покрытие/сплав Ti-6Al-4V». Кроме того, изменением режимов воздействия КПП можно целенаправленно регулировать шероховатость поверхности, являющуюся одним из основных факторов, необходимых для успешной остеоинтеграции костных имплантатов [2].

Цель работы — исследование элементного и фазового состава, микротвердости и коэффициента трения, шероховатости поверхности сплава Ti-6Al-4V, с предварительно нанесенным покрытием Ti и Zr, подвергнутого воздействию КПП с различной плотностью энергии.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовались образцы титанового сплава медицинского назначения Ti-6Al-4V. На поверхность образцов наносилось покрытие Zr или Ti методом вакуумного катодно-дугового осаждения толщиной 2 мкм. Обработка образцов с предварительно нанесенными покрытиями тремя импульсами КПП азота осуществлялась в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии. Плотность энергии Q варьировалась от 10 до 23 Дж/см² за импульс.

Элементный состав образцов определялся методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с помощью детектора Rbentec, сопряженного с растровым электронным микроскопом LEO1455VP. Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с помощью дифрактометра RIGAKU Ultima IV в геометрии параллельного пучка в Cu K α -излучении. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3. Трибологические испытания проводились на установке ТАУ-1М (по схеме «палец—плоскость») при возвратно-поступательном движении индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8. Параметры шероховатости определялись по базовой длине 0,8 мм на

профилометре Mahr MarSurf SD 26.

Результаты и обсуждение. Установлено, что обработка тремя импульсами КПП при $Q = 10-23$ Дж/см² сплава Ti-6Al-4V с предварительно нанесенным покрытием Ti и Zr сопровождается гомогенизацией элементного состава, а также снижением концентрации V до 1,5 раза и Al до 1,7 раза в переплавленном слое, толщина которого в зависимости от плотности энергии Q изменяется от 18 до 25 мкм. Повышение плотности энергии с 10 до 23 Дж/см² приводит к снижению концентрации Zr с 11,6 до 5,8 ат.%, соответственно, в случае воздействия на систему Zr/Ti-6Al-4V. Методом РСМА зафиксировано присутствие азота в поверхностном слое обрабатываемых систем толщиной 1 мкм.

Методом РСА установлено формирование нитрида титана δ -TiN_x и твердого раствора на основе α -Ti в поверхностном слое изучаемых систем, а при воздействии КПП на систему Zr/Ti-6Al-4V — формирование твердого раствора на основе высокотемпературной фазы титана β -Ti(Zr), обладающей меньшими значениями модуля упругости и большей совместимостью по механическим свойствам с костными тканями. Объемная доля фазы β -Ti(Zr) уменьшается с уменьшением концентрации циркония.

Воздействие КПП на исследуемые системы сопровождается формированием развитой структуры поверхности в условиях сверхбыстрого охлаждения с параметром шероховатости Ra от 1,09 до 1,63 мкм в зависимости от плотности энергии и элемента нанесенного покрытия и приводит к увеличению микротвердости до 1,5 раза и снижению коэффициента трения до 2,8 раза поверхностного слоя за счет диспергирования структуры, образования нитридных фаз, что в совокупности может обеспечивать более высокие эксплуатационные характеристики поверхности имплантатов и может приводить к улучшению остеоинтеграции костных имплантатов.

1. Mohammed M.T., Khan Z.A., Siddiquee A.N. Surface Modifications of Titanium Materials for developing Corrosion Behavior in Human Body Environment // Procedia Materials Science. — 2014 (6), 1610—1618
2. Перикова М.Г. Клинико-лабораторное обоснование винтовых дентальных имплантатов с развитой топографией поверхности и биоактивными свойствами поверхности: дис. ... к-та мед. наук: 14.01.14. — Ставрополь. — 2014

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ УЛЬТРАТОНКИХ СИЛОКСАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

А.В. Наумкин¹, М.В. Горошков¹, И.О. Волков¹, О.И. Щеголихина¹,
А.А. Анисимов¹, Н.С. Гаврюшенко², Ю.С. Высочинская¹, А.П. Краснов¹

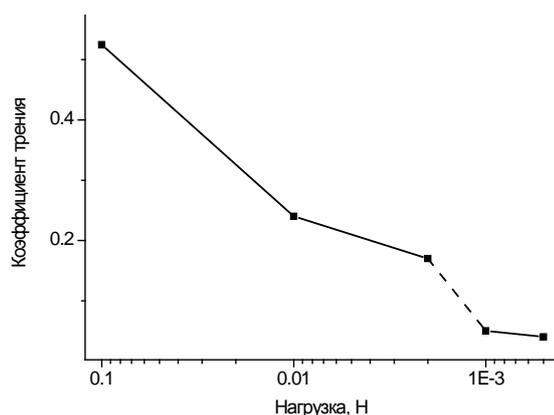
¹Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия; naumkin@ineos.ac.ru

²ФГБУ «ЦИТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия

К альтернативному варианту создания ультратонких самосмазывающих покрытий можно отнести формирование ультратонкого слоя фторированного силоксана на поверхности покрытия посредством сегрегации. Такой метод позволяет обогащать поверхность соединениями с низким коэффициентом трения, а нижний слой (подслой) использовать в качестве клеевого либо армирующего [1].

В качестве полимера-матрицы применяли эпоксидную смолу Э-05К, а для ее отверждения — 3-аминопропилтри-этоксисилан. Модификатором поверхности служил разветвленный статистический сополимер — N-(3-триэтоксисилпропил)-перфторгептанамид с фенилтриэтоксисиланом в соотношении 1:2 с молекулярной массой 5000 Да. Ультратонкие покрытия исследовали на машине трения возвратно-поступательного типа Nanovea Tribometer T-50.

Результаты, полученные методом РФЭС, свидетельствуют, что поверхность образца в пределах информационной глубины ~5 нм состоит из модификатора, т.е. на поверхности формируется тончайший, химически однородный слой, в основном состоящий из относительно коротких ветвей модификатора с преобладанием групп C(O)N, CN и CF₃.



Влияние нагрузки на коэффициент трения керамического контртела по ультратонкому покрытию

Результаты, усредненные по четырем циклам трения каждого эксперимента, представленные на

графике, свидетельствуют, что трибологические зависимости четко разделяются на две части: с интервалом от 0,1 до 0,002 Н и от 0,001 до 0,0005 Н.

Трение покрытия с относительно значимыми нагрузками характеризуется более низкими значениями коэффициента трения при уменьшении нагрузки, что, вероятно, обусловлено возрастанием роли самосмазывающегося материала поверхностного покрытия из-за понижения глубины проникновения контртела в эпоксидную подложку. В результате, в этот период при постоянном снижении механической составляющей силы трения происходит относительный рост адгезионной составляющей.

Резкое снижение коэффициента трения при $P = 0,001$ Н вызвано принципиальными изменениями условий трения. С использованием оптического микроскопа не удалось получить изображение следа трения опытов при нагрузках 0,001 и 0,0005 Н. Вероятно минимальные нагрузки способствуют смещению зоны трения в самосмазывающуюся поверхностную пленку, что позволяет достичь минимальных значений коэффициента трения 0,02—0,06.

Необычно высокое значение трения покоя в этом интервале нагрузок связано с высоким значением адгезионной составляющей. Вероятно, это обусловлено особыми физико-механическими свойствами покрытия с протяженностью в глубину, по крайней мере, 5 нм, образовавшегося в результате сегрегации на поверхность низкомолекулярного модификатора с неупорядоченным расположением ветвей. Подобное, немонолитное строение наружной поверхности способствует росту адгезионной составляющей при минимальных нагрузках, приводя к явлению типа «стоп-эффект». При начале движения адгезионное сопротивление преодолевается, и дальнейшее трение осуществляется только по наружной самосмазывающейся поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 13-15-00061).

1. Краснов А.П., Наумкин А.В., Панова М.О., Переяславцев А.Ю., Гаврюшенко Н.С., Булгаков В.Г., Юдин Г.А., Ковалева Т.А. Трение ультратонких Si, F-содержащих покрытий // Трение и износ. — 2017, № 4

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

М.О. Панова^{1,2}, Д.И. Буяев³, Н.Д. Каграманов¹,
Ю.Н. Смирнова², Л.Ф. Клабукова², А.П. Краснов¹

¹Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия; krasnov@ineos.ac.ru

²Российский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

³ООО «ОВИТЭК»

Термическая обработка фенолоформальдегидных (ФФ) полимеров и композитов на их основе имеют большое значение в технологии термостойких антифрикционных материалов. Как правило, эта технологическая операция входит в регламент промышленного материала на основе ФФ полимера.

В период приработки большую роль в трении нетермообработанного материала играет «трибохимическая смазка», способствуя получению низкого коэффициента трения. Однако, в этот же период наблюдается повышенный износ, широкий интервал амплитуды колебания коэффициента трения, что связано, вероятно, с активным процессом трибохимического отверждения из-за сочетания механического и термического воздействий.

Задачей данного исследования является стабилизация процесса трения ФФ полимера путем термообработки, включающей физические и химические методы модификации, что способствует повышению износостойкости, снижению амплитуды колебания и величины коэффициента трения.

Была разработана методика введения в материал различных полимеров с целью формирования на поверхности дискретного контакта. Это достигалось пропиткой термостабильных тканей или волокон (напр. полиоксадиазольных — ПОД) смолой, содержащей твердые частицы полифениленсульфида (ПФС). Другим перспективным модификатором органоластов может выступать полиформальдегид (полиоксиметилен — ПОМ). Благодаря высокой износостойкости, коррозионной стойкости, способности к самосмазыванию и относительно низкому коэффициенту трения этот материал может использоваться в качестве заменителя цветного металла в узлах трения скольжения. Однако в качестве модификатора органоластов ранее ПОМ не использовался.

Были изучены трибологические свойства ФФ композитов, армированных ПОД волокнами, и модифицированных полиформальдегидом, термообработанные в течение 2, 4, 6, 8 и 10 часов (в термошкафу при $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для модифицирования применяли измельченный в атмосфере жидкого азота полиформальдегид с размерами полученных частиц от 50 до 250 мкм. Лучшие показатели были достигнуты при двухчасовой термообработке (рис.).

Для оценки влияния введения ПОМ на состав газообразных продуктов выделения того же ФФ композита, был проведен масс-спектрометрический анализ образцов, прошедших четырех- и восьми-

часовую термообработку (при $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Согласно полученным спектрограммам, по росту интенсивности иона с $m/z = 30$, характерного для формальдегида и иона с $m/z = 94$, характерного для фенола, были оценены температурные интервалы их термосорбции, а по доли этих ионов в полном ионном токе также было оценено и их соотношение (табл.).

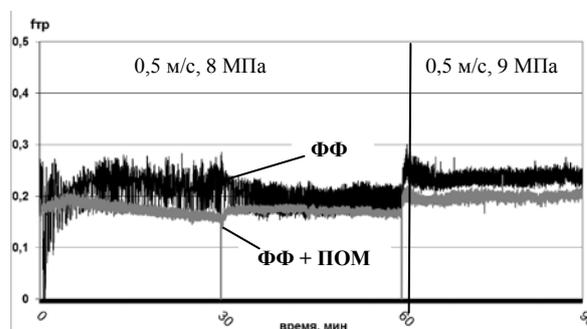


Рис. Коэффициенты трения ФФ композитов, армированных ПОД волокном и модифицированных ПОМ после двухчасовой термообработки при $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица. Соотношение долей ионного тока в полном ионном токе для фенола и формальдегида исследуемых образцов ФФ композита и ФФ композита, модифицированного ПОМ при разных условиях термообработки

термообработка при $120\text{ }^{\circ}\text{C}$	$m/z = 94$ (фенол)		$m/z = 30$ (формальдегид)	
	ФФ	ФФ + ПОМ	ФФ	ФФ + ПОМ
4 часа	15%	8,67%	2,17%	1,86%
8 часов	5,67%	3,08%	1,15%	1,46%

Результаты (табл.) свидетельствуют, что ПОМ обеспечивает не только дискретный контакт при трении, но и является донором формальдегида, что приводит к быстрой стабилизации фрикционной поверхности.

Таким образом, полученные результаты термообработки ФФ полимера свидетельствуют о возможности значительного сокращения продолжительности процесса приработки, снижения амплитуды колебания и величины коэффициента трения антифрикционных органоластов на основе ФФ полимера.

1. Юдин А.С., Буяев Д.И., Афоничева О.В., Горячева И.Г., Краснов А.П. Трение полимерных самосмазывающихся композитов, армированных термостойкими тканями // Трение и износ. — 2013 (34), № 4, 599—607

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОГО МАСЛА 10W40 ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАСТИНЧАТЫХ ХЛОПЬЕВ ОКИСЛЕННОГО ГРАФИТА

А.В. Сидашов¹, А.Т. Козаков², Н. Кумар³, В.И. Колесников¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;
sav_teor_meh@rgups.ru

²Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия

³Центр атомных исследований им. Индиры Ганди, Калпаккам Тамил Наду, Индия

Цель. Настоящая работа посвящена исследованию трибологических свойств модифицированного минерального масла 10W40 путем введения окисленных слоистых хлопьев графита.

Материалы и методы. С помощью ультразвуковой обработки была изменена химическая структура графитового порошка. Химическое строение материала исследовалось с помощью методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (далее — РФЭС) и спектроскопии комбинационного рассеяния. Оптический микроскоп был использован для оценки морфологии порошка графита. Трибоиспытания графитовых присадок выполнили с помощью стандартного трибометра «шар на диске».

Результаты и обсуждение. На рис. 1, а—с представлены морфология (а) порошка графита, (b) обработанного ультразвуковым облучением и (с) состаренных в течение одного месяца и обработанных ультразвуком порошковых образцов графита. Микрометровых размеров частицы можно наблюдать в образце графитового порошка.

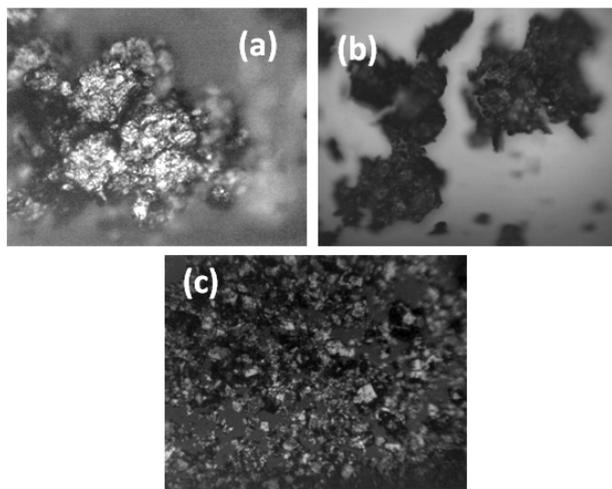


Рис. 1. Микрофотографии: порошка графита (а); после ультразвуковой обработки порошка графита (USG) (b); после облучения ультразвуком графитового порошка и состаренного в течение одного месяца в окружающей среде (USAG) (с)

После ультразвуковой обработки частицы рас-

слаиваются и механически деформируются, благодаря энергии кавитации, генерированной при ультразвуковой обработке. Последнее проявляется в формировании частиц меньшего размера.

Результаты РФЭС и комбинационного рассеяния, показали, что в решетке графита содержатся карбоксильные и гидроксильные группы. Большое количество кислородсодержащих функциональных групп зарегистрировано в образце USAG по сравнению с образцом USG. Наличие кислородсодержащих функциональных групп является основной причиной повышения стабильности диспергирования присадки.

Для обоих образцов коэффициент трения уменьшается с увеличением концентрации графитовых присадок в масле 10W40. Установлено, что при превышении определенного значения концентрации графитовых присадок, коэффициент трения начинает постепенно увеличиваться. Наименьшие значения коэффициентов трения 0,135 и 0,118 были получены при концентрациях присадок, равных 0,08 и 0,05 мг/мл в образцах USG и USAG, соответственно. Уменьшение коэффициента трения в образце USAG достигает примерно 30% по сравнению с чистым маслом 10W40. При оптимизированных значениях концентраций оба образца USG и USAG также показывают значительно меньший износ по сравнению с чистым маслом 10W40.

В обоих образцах коэффициент трения высок при очень небольших концентрациях добавок. В этих условиях смешивание присадок недостаточно и доминирует механизм трения, присущий маслу 10W40. Однако, с повышением концентраций присадок, значение коэффициента трения постепенно уменьшается. Трение при этом определяется графитовыми примесями на контакте совместно с маслом 10W40.

Благодарности. Исследование образцов методом РФЭС выполнено А.В. Сидашовым и В.И. Колесниковым за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00116) в Ростовском государственном университете путей сообщения.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНОГО ГРАФЕНА С ЖИДКИМИ КРИСТАЛЛАМИ В АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

Н.Н. Рожкова¹, А.В. Казак², А.И. Смирнова²,
Н.В. Усольцева², М.В. Козинец³, А.А. Гвоздев³

¹Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, rozhkova@krc.karelia.ru

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

³Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, Иваново, Россия

Введение. Углеродные наночастицы представляют интерес в качестве добавок в составе смазочных материалов для повышения надежности и износостойкости двигателей внутреннего сгорания [1]. В композиционных материалах на основе жидкокристаллических (ЖК) матриц при введении нанотрубок наблюдается улучшение свойств смазочных материалов. Исследования смазок на основе мезогенов показали эффективность замены активных присадок на материалы, смазочное действие которых основано на надмолекулярной самоорганизации в граничном смазочном слое [2]. Наибольший эффект в антифрикционных композиционных материалах, также как и в смазках, ожидается при использовании графеновых частиц [3]. Отмечено, что графеновые флоккулы обладают способностью к самоорганизации в нематическое ЖК. Однако механизмы формирования наноструктурированных пленок на основе графенов и их свойства не исследованы.

В работе эта задача решается при использовании графеноподобных наночастиц шунгитового углерода (ШУ) [4]. Структурные уровни ШУ — графеновые фрагменты, стопки и глобулярные агрегаты высвобождаются в водной дисперсии. При изменении полярности среды, в хлороформе, наночастицы ШУ преимущественно представлены графеновыми фрагментами в виде флокул и стопок, которые сохраняются при конденсации дисперсии на различных подложках [5]. Повышение износостойкости и прочности композиционных материалов при введении наночастиц ШУ следует ожидать от способности самоорганизующихся графеновых фрагментов ШУ к образованию 3-х мерной сетки.

Материалы и методы

Физико-химические свойства и структурные особенности наночастиц ШУ в ЖК системах были исследованы на примере холестерических мезогенов — тридецилат холестерина (марка Х-20) с использованием оптических и спектральных (КР) методов и термического анализа (ТА). Определены реологические характеристики и динамические свойства композиций ШУ-ЖК [6]. Эти композиции вводились в присадки в минеральные масла, триботехнические свойства которых являются предметом исследований.

Возможные механизмы взаимодействия наночастиц ШУ с ЖК матрицей в антифрикционных композициях и смазках обсуждаются в докладе.

Результаты и обсуждение

Термотропный мезоморфизм холестерического мезогена при введении наночастиц ШУ характеризуется расширением области существования смектической (Sm) А фазы за счёт понижения температуры фазового перехода SmA–кристалл, что согласуется с образованием многослойных пачек из графеновых фрагментов ШУ.

Наблюдаемое снижение вязкости при повышении напряжения сдвига в композиции ЖК-ШУ объясняется способностью многослойных пачек распадаться на отдельные графеновые фрагменты под действием напряжений сдвига [6]. Упругость системы в SmA-фазе в присутствии ШУ также понижается с увеличением концентрации наночастиц.

Данные ТА подтверждают взаимодействие наночастиц ШУ с ЖК матрицей: растет температура фазового перехода с 68 до 98 °С.

Смазки с наночастицами ШУ исследовали в качестве присадок в масло М-10Г2К при трении по схеме скольжения “ролик — колодка” в условиях граничного трения пары сталь—чугун. Определено влияние присадок в диапазоне концентраций от 1—3 мас.% при концентрациях наночастиц ШУ (0,005—0,05 мас.%) на основные триботехнические характеристики (момент трения, температура в зоне трения и время стабилизации).

Обсуждается возможность активации графеновых фрагментов и стопок, позволяющая обеспечить антифрикционность смазки покрытия на контакте с металлической поверхностью.

1. Gupta B.K. and Bhushan B. Fullerene Particles as an Additive to Liquid Lubricants and Greases for Low Friction and Wear // Lubrication Engineering. — 1994 (50), 524—528
2. Березина Е.В. Производные фталоцианина как присадки к смазочным композициям. — Иваново: ИВГУ. — 2007
3. Hang Chen and Filleter T. Effect of Structure on the Tribology of Ultrathin Graphene and Graphene Oxide Films // Nanotechnology. — 2015 (26), no. 13
4. Rozhkova, N.N., Rozhkov S.P., and Goryunov A.S. / In Carbon Nanomaterials Sourcebook. Volume I: Sattler K.D.; — CRC Press. — 2016, 151—174
5. Razbirin B.S., Rozhkova N.N., and Sheka E.F. Photonics of Shungite Quantum Dots / in Graphene Science Handbook: Electrical and Optical Properties. — CRC Press. — 2016, 425—436
6. Усольцева Н.В., Смирнова М.В., Казак А.В., Смирнова А.И., Бумбина Н.В., Ильин С.О., Рожкова Н.Н. Реологические характеристики дисперсий различных углеродных наночастиц в холестерических мезогенах как присадок к СОТС // Трение и износ. — 2015 (36), № 5, 499—505

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 5

**Фторполимеры:
получение, исследования, применение**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А.А. Охлопкова¹, Т.С. Стручкова¹, А.П. Васильев¹, А.Г. Алексеев¹, П.Н. Гракович²

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия; gtvap@mail.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Среди полиолефиновых полимеров политетрафторэтилен (ПТФЭ) обладает уникальными антифрикционными свойствами в широком интервале температур при сохранении низких и стабильных значений коэффициента трения [1]. Применение углеродных волокон (УВ) в качестве наполнителя ПТФЭ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами волокон. Известно, что УВ обладают повышенной прочностью, износостойкостью и минимальными (по сравнению с другими типами волокон) абразивным воздействием на сопряженное контртело [2]. Среди углеродных наполнителей использование модифицированных углеродных волокон с низкой поверхностной энергией представляется наиболее предпочтительной для модификации ПТФЭ [3].

Цель работы — исследование влияния комплексных наполнителей на физико-механические и триботехнические свойства политетрафторэтилена.

Материалы и методы. В качестве полимерной матрицы использовали ПТФЭ марки ПН-90, ОАО «ГалоПолимер», Россия. Наполнителями служили модифицированные короткие углеродные волокна (УВ) марки «Белум», ОАО «Светлогорск Химволокно», Беларусь. В качестве дисперсного наполнителя использовали, предварительно механоактивированный каолинит (Кл), Анапского месторождения, Россия. В качестве полимерного наполнителя использовали ультрадисперсный ПТФЭ (УПТФЭ) марки «Флуралит», Россия.

Образцы для испытаний изготавливали по стандартным методикам: гомогенизацию композиции проводили в высокоскоростном лопастном смесителе, прессование при удельном давлении 50 МПа и спекание при 370 ± 5 °С. Физико-механические характеристики ПТФЭ и ПКМ определяли по стандартной методике ГОСТ 11262-80 на универсальной испытательной машине «AUTOGRAF» («Shimadzu AGS-J», Япония). Триботехнические характеристики ПТФЭ и ПКМ определяли по стандартной методике (ГОСТ 11629-75) на трибомашине UMT-3 (SETR, США) по схеме трения «палец — диск». Контртело — стальной диск из стали марки 45 с твердостью 45—50 HRS, шероховатость $R = 0,06—0,08$ мкм. Удельная нагрузка — 2 МПа, линейная скорость скольжения — 0,2 м/с. Время испытания 3 часа.

Результаты и обсуждение. Ранее было исследовано влияние модифицированных углеродных во-

локон на свойства ПТФЭ [4]. В данной работе приведены результаты деформационно-прочностных и триботехнических свойств ПКМ с комплексными наполнителями (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические и триботехнические характеристики и плотности ПТФЭ и ПКМ

Образец	σ_{pp} , МПа	ϵ_p , %	J , $\times 10^{-6}$ кг/ч	f
ПТФЭ исходный	20 ± 1	320 ± 32	160	0,22
ПТФЭ + 1 мас.% УВ + 1 мас.% Кл	19 ± 1	335 ± 33	0,44	0,27
ПТФЭ + 3 мас.% УВ + 1 мас.% Кл	20 ± 1	294 ± 29	0,25	0,28
ПТФЭ + 5 мас.% УВ + 1 мас.% Кл	20 ± 1	328 ± 32	0,16	0,24
ПТФЭ + 1 мас.% УВ + 1 мас.% Кл + 1 мас.% УПТФЭ	19 ± 1	319 ± 31	0,32	0,28
ПТФЭ + 3 мас.% УВ + 1 мас.% Кл + 1 мас.% УПТФЭ	20 ± 1	299 ± 29	0,14	0,25
ПТФЭ + 5 мас.% УВ + 1 мас.% Кл + 1 мас.% УПТФЭ	20 ± 1	314 ± 31	0,13	0,28

Примечание. σ_{pp} — прочность при разрыве; ϵ_p — относительное удлинение при разрыве; ρ — плотность.

Как видно, введение комплексных наполнителей позволяет повысить износостойкость композиций по сравнению с исходным полимером при сохранении деформационно-прочностных свойств на уровне исходного полимера. Коэффициент трения композиций в заданных условиях испытания незначительно повышается по сравнению с исходным полимером. Полученные материалы могут применяться в узлах трения машин и механизмов в качестве триботехнических материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания Минобрнауки РФ № 11.1557.2017/К.

- Охлопкова А.А. и др. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). — 2008 (52), № 3, 147—153
- Авдейчик С.В. и др. Фторсодержащие ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / под науч. ред. В.А. Струка. — Минск: Тэхналопя. — 2011.
- Shelestova V.A., Grakovich P. N., and Zhandarov S.F. A Fluoropolymer Coating on Carbon Fibers Improves their Adhesive Interaction with PTFE Matrix // Composite Interfaces. — 2011 (18), no. 5, 419—440
- Ohlopokova A.A., et al. Studying the Properties and Structure of Polytetrafluoroethylene Filled with Belum Modified Carbon Fibers // Journal of Friction and Wear. — 2016 (37), no. 6, 529—534

СПОСОБ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СОСТАВА
КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА-4

А.Л. Башлакова

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
bashlakova.anna@mail.ru

Введение. Основной проблемой при анализе композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (Фторопласт-4, Ф-4) является разделение материала матрицы и наполнителя. Так, известные способы выделения наполнителя из композиционного материала путем химического вытравливания полимерного связующего не подходят для наполненного Ф-4, т.к. он принципиально не растворим ни в одном из известных растворителей. Метод нагревания до температуры разложения полимерного связующего и расчет содержания наполнителя по изменению массы образца также плохо применим к композитам на основе Ф-4, т.к. для фторопластовой матрицы это означает нагрев до температуры 600...1000 °С. Это неприемлемо для многих наполнителей — так, стекловолокна при такой температуре спекаются в ком, алмазные частицы превращаются в графит, дисульфид молибдена и арамидные волокна начинают активно разлагаться и/или окисляться (при наличии кислорода) уже при 450...500 °С.

Цель работы — используя стандартные методы исследований, разработать методику качественного анализа композита на основе Ф-4.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи предлагается способ определения наполнителя в полимерном композите, состоящий в анализе места разрыва композита, поверхность которого дополнительно протравлена излучением CO₂-лазера. В этих условиях реализуется эффект аномально быстрого разложения Ф-4 с вытравливанием частиц наполнителя. Для определения общего вида поверхности, формы волокон и других частиц, химического состава отдельных составляющих материала использовали электронный растровый электронный микроскоп VEGA II LSH с системой энергодисперсионного элементного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD. Съёмки проводили в режиме регистрации вторично-отраженных электронов, в котором тяжелые элементы имеют яркое свечение [1].

Результаты и их обсуждение. На приведенных ниже фотографиях представлены образцы относительно малонаполненного импортного композита неизвестного состава.

Предлагаемый способ анализа композиционного материала на основе фторопласта-4 состоит из ряда последовательных стадий.

1. Небольшой образец композита с надрезом

разрывают на две части при комнатной температуре.

2. Образец композита размером около 1 см помещают в вакуумную камеру с давлением не более 10 Па и облучают непрерывным излучением CO₂-лазера (10,6 мкм) с интенсивностью 20...50 Вт/см² в течение 5...10 с.

3. Место разрыва и часть облученной поверхности (как правило, размером несколько мм) после соответствующей стандартной подготовки (нанесение золота или графита для обеспечения стекания электронов) рассматривают в растровом электронном микроскопе в режиме вторичных электронов (SE), обеспечивающем наилучшее разрешение и контраст. При этом обращают внимание на наличие инородных частиц во фторопластовой матрице и на их размеры и форму.

4. РЭМ переводят в режим обратно отраженных электронов (детектор BSE). При наличии частиц, имеющих в своем составе тяжелые элементы (например, железо, молибден, барий и т.п.) они выделяются ярким свечением.

5. С помощью специальной приставки для энергодисперсионного микроанализа проводят качественный химический анализ светящихся в режиме BSE частиц.

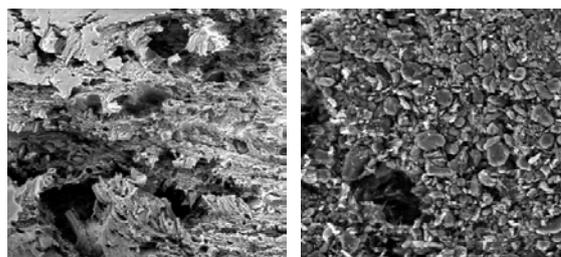


Рис. Топография поверхности разрыва образца: а — до лазерной абляции, б — после

После процедуры травления, вследствие деструкции фторопластовой матрицы, можно отчетливо рассмотреть и оценить типовую форму и размеры частиц наполнителя композита. В данном композите наполнителем является нитрит титана размерами от 5 до 40 мкм.

1. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. — М.: Машиностроение. — 2005

ТРИБОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА, НАПОЛНЕННОГО ТЕРМОРАСШИРЕННЫМ ГРАФИТОМ

В.Н. Адериха, В.А. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
vnad@tut.by

Введение. Известно, что полимеры претерпевают при трении сложные деструктивно-структурирующие превращения, которые определяют формирование поверхностей трения и оказывают определяющее влияние на трибологические характеристики пары трения [1]. В случае ПТФЭ, возможно в силу его непревзойденной химической инертности и нерастворимости в известных растворителях, исследованию трибохимических процессов до последнего времени уделялось меньшее внимание. В работах Sawyer с соавт., посвященных исследованию трибохимических процессов в нанокompозите ПТФЭ- α - Al_2O_3 , обоснована связь между трибохимическими процессами в нанокompозите и скоростью его изнашивания [2], согласно которой скорость изнашивания на воздухе определяется возможностью гидролиза фторангидридных групп (продуктов окисления механорадикалов ПТФЭ) в карбоксильные группы. Согласно предложенному механизму, во влажной атмосфере образуются перфторкарбоновые кислоты, взаимодействие которых как с железом контртела, так и с частицами нанонаполнителя, обеспечивает прочную связь пленки переноса с поверхностью контртела, упрочнение поверхности трения композита и, как следствие, высокую износостойкость пары трения. В сухой атмосфере этот механизм не работает и скорость изнашивания резко возрастает.

Цель работы — оценить влияние ультразвукового (УЗ) диспергирования терморасширенного графита (ТРГ) на трибохимические процессы и износостойкость его композита с политетрафторэтиленом (ПТФЭ).

Материалы и методы. В работе использовали ПТФЭ марки Пн и терморасширяемый графит марки GRAFT EG-350 (КНР), который термообработывали на воздухе при 550 °С и УЗ-диспергировали в воде с помощью УЗДН-1УЧ2 (20 кГц, 100 Вт, 1 час). Композиты с 5 мас.% ТРГ получали спеканием заготовок при 380 °С. Трение по стали проводили по схеме вал—частичный вкладыш (без смазки) в условиях контролируемой влажности и температуры. Исходные композиты, поверхности трения и продукты износа изучали методами ИК-спектроскопии, ДТА, СЭМ и электронно-зондового анализа (ЭЗА).

Результаты и обсуждение. Показано, что при трении в условиях умеренной и высокой влажности воздуха, характеризующихся высокой износостойкостью пары трения, в поверхностном слое композита и продуктах износа увеличивается содержание карбокси-

латов железа, что говорит о повышенном износе контртела вследствие адсорбционного понижения прочности при взаимодействии стали с продуктами деструкции ПТФЭ и парами воды. В этих условиях испытаний в продуктах изнашивания также отмечается повышение содержания наполнителя с 5 до 10...14 мас.%, что способно существенно повысить износостойкость композита. Напротив, при трении в сухом воздухе, характеризующемся низкой износостойкостью, карбоксилаты железа не обнаруживаются: в ИК-спектрах присутствуют полосы поглощения карбонильных групп и слабый сигнал карбоксильных групп, образовавшихся, предположительно, после извлечения образца из «сухой» камеры, и накопление $\text{TRF}^{-\text{Y3}}$ в продуктах изнашивания выражено слабо. (Таблица [3]).

Отн. влажность, %	K_w , мм ³ /Нм*	Приведенная K_w	$C_{\text{ЭЗА}}^{\text{Fe}}$, мас.%	$m_{\text{ГТА}}^{620\text{C}}$, %
4	$15,3 \times 10^{-6}$	22,8	$0,04 \pm 0,02$	8,0
53	$2,45 \times 10^{-6}$	3,65	$1,15 \pm 0,95$	14,1
83	$0,67 \times 10^{-6}$	1	$1,59 \pm 0,85$	14,2

*путь трения 25—35 км, $V = 0,17$ м/с, $P = 400$ Н

Полученные результаты позволяют говорить о том, что трибохимический механизм повышения износостойкости композитов ПТФЭ при трении во влажной воздушной атмосфере не ограничивается хемосорбционным взаимодействием карбоксилированных макромолекул ПТФЭ со стальным контртелом и соответствующим увеличением адгезии пленки переноса и взаимодействием с амфотерными частицами нано- Al_2O_3 в слое трения композита [2], а также включает упрочнение поверхности трения композита ультрадисперсными частицами стального контртела, и частицами $\text{TRF}^{-\text{Y3}}$, реакционная способность которых обеспечивается остаточными кислородсодержащими групп (гидроксильных, эпоксидных, карбоксильных) и усиливается УЗ обработкой.

1. Краснов А.П., Грибова И.А., Чумаевская А.Н. Химическое строение полимеров и трибохимические превращения в полимерах и наполненных системах // Трение и износ. — 1997 (18), № 2, 258—279
2. Harris K.L., Pitenis A.A., Sawyer W. G., Krick B.A., Blackman G.S., Kasprzak D.J., and Junk C.P. PTFE Tribology and the Role of Mechanochemistry in the Development of Protective Surface Films // Macromol. — 2015 (48), no. 11, 3739—3745
3. Aderikha V.N., Krasnov A.P., Naumkin A.V., and Shapovalov V.A. Effects of Ultrasound Treatment of Expanded Graphite (EG) on the Sliding Friction, Wear Resistance, and Related Properties of PTFE-Based Composites Containing EG // Wear, в печати

УГЛЕРОДНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ ФТОРПОЛИМЕРОВ УВИ-ПХОП.Н. Гракович, В.А. Шелестова¹, М.В. Полховский², А.А. Сарычев²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси;
²ОАО «СветлогорскХимволокно», Светлогорск, Беларусь

Постановка задачи. Углеродные волокна (УВ) являются эффективным наполнителем фторполимеров для получения антифрикционных материалов (Флубон, Флувис). Применение плазмохимически модифицированных УВ с фторполимерным покрытием на их поверхности (Белум) позволило значительно повысить износостойкость и надежность фторкомпозитов (Суперфлувис) [1].

Однако до настоящего времени углеродный материал Белум применялся для наполнения фторопласта-4 только на одном предприятии — ОАО «Гродненский механический завод», хотя интерес к нему проявляли и другие производители фторполимеров. Проблемы при применении углеродных тканей в производстве фторкомпозитов обусловлены особыми требованиями к измельчительному оборудованию и недостаточной изученностью измельченного углеродного материала.

Возникла необходимость разработать измельченный углеродный наполнитель, который можно применять для получения фторкомпозитов с требуемыми свойствами на производствах, не имеющих необходимого измельчительного оборудования. Стояла задача изучить влияние свойств и фракционного состава измельченных УВ на характеристики композитов с различными фторполимерными матрицами, разработать технологию, оборудование и нормативно-техническую документацию на новый наполнитель.

Материалы и методы. В качестве исходных углеродных материалов использовали различные марки тканей и лент производства ОАО «СветлогорскХимволокно» с вариациями их свойств, что достигалось различными технологиями пропитки, температурой термообработки, видом плетения. Ткани подвергали плазмохимической обработке (ПХО) в среде фторсодержащих газов на специально разработанной установке в ИММС НАН Беларуси и далее измельчали на стенде на ОАО «СветлогорскХимволокно» и определяли их свойства (содержание углерода, фракционный состав, насыпная плотность, прочность и др.)

Измельченные УВ использовали для получения композиций с двумя типами фторполимеров: фторопласт-4 (на ОАО «ГМЗ») и фторкаучук СКФ-26 (на ОАО «Уральский завод РТИ») [2]. Определение физико-механических характеристик полученных материалов определяли по стандартным методикам.

Результаты и обсуждение

Изучено влияние свойств исходных углеродных материалов и фракционного состава измельченных УВ на свойства композитов. На основе результатов разработаны ТУ ВУ 400031289.128-2015, продукт получил название УВИ-ПХО, к которому добавляется цифра 12, 15, 19 или 22 в зависимости от класса термообработки.

Определено, что для получения композита на основе Ф-4 с наилучшими антифрикционными свойствами требуется использовать УВИ-ПХО 12-го класса и обеспечить фракционный состав: фракция менее 50 мкм — 50...65%; фракция 60 -100 мкм — 10...12%.

Исследования эластомерной композиции на основе фторкаучука показали, что ее характеристики существенно повышаются при замене традиционно применявшихся УВ марки Викарб на УВИ-ПХО. Причем для фторкаучуков свойства композиции менее чувствительны к длине УВИ-ПХО. Так, применение более длинных УВ повышает относительное удлинение при разрыве, снижает остаточные деформации. Прочность, потери при истирании такие же, как и у составов с более короткими УВ, но превышающие таковые с Викарбом.

Испытания разработанных эластомерных композиций в качестве уплотнений показали 5...10-кратное увеличение ресурса особо ответственных узлов специзделий. ОАО «Уральский завод РТИ» начал применять разработанные композиции в своем производстве и заключил договор с ИММС НАН Беларуси на поставку УВИ-ПХО.

Разработанная технология, оборудование и нормативная документация для опытно-промышленного производства УВИ-ПХО позволяют расширить применение углеродных волокон с фторполимерным покрытием и выпускать экспортно-ориентированный продукт.

Работа выполнена в рамках темы 5 научно-технической программы Союзного государства «Компомат».

1. Гракович П.Н., Шелестова В.А., Данченко С.Г., Жандаров С.Ф., Смирнов А.В., Шкурский И.А. Проблемы применения композиционных материалов «Флувис» и «Суперфлувис» в компрессоростроении. // Технические газы — 2013, № 3, 68—72
2. Маскалонайта О.Е., Заболотских С.Ю., Некрасова В.В., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Шелестова В.А. Исследование эластомерной композиции с модифицированными углеволкнами // Каучук и резина — 2016, № 2, 48—49

ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА-4

Л.Ф. Иванов, В.М. Макаренко, А.В. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
lfivanov@tut.by

Применение низкотемпературной плазмы для формирования функциональных покрытий достаточно известно [1] и также используется в промышленности. Так в промышленных масштабах осуществляется плазмохимическая обработка (ПХО) материалов в кислородной плазме с целью повышения адгезии при склеивании [2], улучшения смачивания поверхности при окрашивании тканей [3] и т.п. технологических процессах. Отдельным направлением, связанным с использованием ПХО, является обработка наполнителей для композиционных материалов и особенно композитов на основе фторопласта-4. Особенность таких композитов — низкая адгезия матрицы практически к любым наполнителям, что не позволяет достичь высоких прочностных и соответственно эксплуатационных характеристик композита. Предложено формировать на наполнителе монослой фторорганического покрытия [4], для обеспечения средства поверхности наполнителя материалу матрицы, что обеспечило существенное увеличение значений прочностных характеристик композита.

Цель работы — разработка технологии плазмохимической обработки углеродного наполнителя для композиционного материала на основе фторопласта-4, создание оборудования для ПХО и вспомогательных операций, отработка технологических режимов.

Материалы: в качестве реакционного газа использовали октафторциклобутан (фреон RC 318), в качестве сырья для ПХО — ткань углеродную ЛО-1-12Н/160 и ЛО-1-12Н/600.

Оборудование: для ПХО углеродных материалов разработано оборудование для основного так и вспомогательных процессов.

Стадии обработки следующие: намотка углеродной ткани на технологические шпули, сушка, ПХО, перемотка ткани на транспортные шпули, упаковка.

Разработано устройство для перемотки ткани, позволяющее избежать попадания углеродной пыли в помещение.

Углеродная ткань содержит в зависимости от режима карбонизации 4—5% влаги. Поскольку процесс ПХО проводится в вакууме, то содержание такого количества влаги существенно увеличивает время откачки. Разработано двухкамерное устройство сушки, позволяющее кроме нагрева проводить вакуумирование, продувку воздухом и сухим газом (азотом). Процесс сушки занимает в зависимости от количества сырья до 20 часов.

В установке ПХО можно обрабатывать ткань шириной 63 см до 20 кг в смену. Время нахождения ткани в реакционной камере постоянно и задается

на сенсорном экране пульта управления. Установка работает в полуавтоматическом режиме.

Режимы: при отработке оптимальных режимов обработки варьировали следующие параметры: давление среды в рабочей камере, время обработки, мощность генератора плазмы.

При фиксированной скорости откачки давление устанавливали регулировкой подачи реакционного газа системой напуска СНА-2. Время обработки определяется временем нахождения ткани в реакционной камере. Рост покрытия определяли по изменению частоты кварцевого датчика.



Рис. 1. Зависимость скорости роста покрытия от давления (расхода газа)

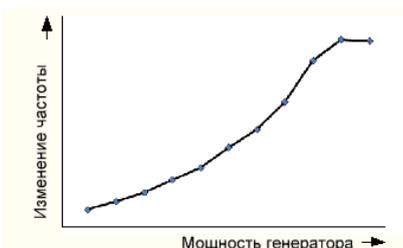


Рис. 2. Зависимость скорости роста покрытия от мощности генератора

Таким образом, разработана технология, позволяющая производительно проводить плазмохимическую обработку углеродных материалов для наполнителей композиционных материалов на основе фторопласта-4.

1. Ясуда Х. Полимеризация в плазме: Пер.с англ.-М.: Мир, 1988. — 376 с.
2. K ppler Iris, Hund Rolf-Dieter, Cherif Chokri. Surface Modification of Carbon Fibres using Plasma Technique. // AUTEX Research Journal. — 2014 (14), no. 1, 34—38
3. Hocker Hartwig. Plasma Treatment of Textile Fibers // Pure Appl. Chem. — 2002 (74), no. 3, 423—427
4. Патент РБ № 6214, Способ модифицирования углеволокнистого наполнителя для политетрафторэтилена / Шелестова В.А., Гракович П.Н. // Заявл. 06.09.1999; Опубл. 30.03.2001 // Официальный бюллетень. — 2001, № 1, 33. — выдан 30.01.2004.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПТФЭ-КОМПОЗИТЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ДИОКСИД КРЕМНИЯ

Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, О.В. Чемисенко, С.С. Акименко

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

Цель работы — разработка износостойких полимерных композиционных материалов (ПКМ) для трибосопрежений с использованием высокоэффективных наполнителей отечественного производства.

Материалы и методы. В настоящей работе исследовались ПКМ на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с наполнителями-модификаторами трех типов. Первый модификатор (наноразмерный) — диоксид кремния марки БС-120 Сажа белая (БС). Второй модификатор (наноразмерный) — технический углерод марки N220 (ТУ). Третий модификатор (микроразмерный) — скрытокристаллический графит марки ГЛС-3 (СКГ). Модификаторы ТУ и СКГ применялись совместно с БС.

При изготовлении образцов использовали технологию холодного прессования и свободного спекания. Эффективность модификации ПТФЭ наполнителями оценивали по результатам триботехнических испытаний образцов ПКМ по схеме «палец—диск» при контактном давлении 2,66 МПа и скорости скольжения 1,2 м/с. Исследование сколов и поверхностей трения ПКМ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-5700. Молекулярно-динамическое моделирование ПКМ проводили с использованием пакета Materials Studio.

Результаты и обсуждение. Полученные зависимости скорости изнашивания J исследуемых ПКМ от массового содержания БС ϕ приведены на рис. 1. Введение БС обеспечивает значительное повышение износостойкости по сравнению с ненаполненным ПТФЭ. Минимальное значение скорости изнашивания для ПКМ системы ПТФЭ+БС получено при $\phi = 2$ мас.% БС. Применение комплексного наполнителя БС+СКГ (8 мас.% СКГ), обеспечивает повышение модифицирующего воздействия наполнителей на матрицу по сравнению с воздействием, оказываемым ими в качестве мономодификаторов. Это проявляется в дополнительном повышении износостойкости ПТФЭ-композиций. Применение комплексного наполнителя БС+ТУ, менее эффективно относительно повышения износостойкости по сравнению с наполнителем БС+СКГ.

Сравнительный анализ результатов электронной микроскопии поверхностей трения ПТФЭ-композиций, содержащих комплексный наполнитель БС+СКГ, показывает, что повышение содержания БС от 1 мас.% до 3 мас.% способствует формированию более однородной поверхности трения с меньшим количеством микротрещин, что согласуется с соответствующим повышением износостойкости ПКМ.

Результаты рентгеноструктурного анализа ПКМ системы ПТФЭ+БС+СКГ свидетельствуют о

том, что повышение степени кристалличности полимерной матрицы объясняется увеличением количества областей когерентного рассеяния (среднего размера кристаллитов).

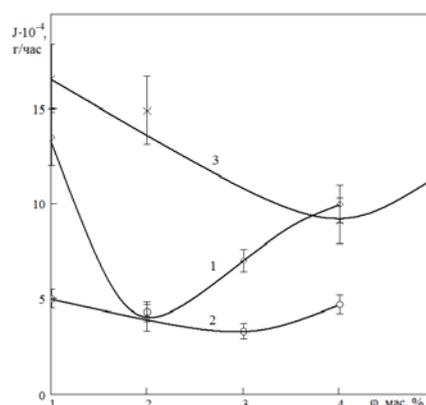


Рис. 1. Зависимости скорости изнашивания ПТФЭ-композиций от массового содержания БС: 1 — наполнитель БС; 2 — наполнитель БС + 8 мас.% СКГ; 3 — наполнитель БС + 2 мас.% ТУ

В рамках молекулярно-динамического моделирования системы «ПТФЭ + диоксид кремния» установлено, что вблизи межфазной границы в ПТФЭ-матрице формируются граничные слои, характеризующиеся осцилляцией плотности (рис. 2). Эта закономерность модифицирующего воздействия наполнителя на структуру матрицы предположительно является результатом массопереноса в формирующейся структуре ПТФЭ-матрицы, направленного к поверхности наполнителя.

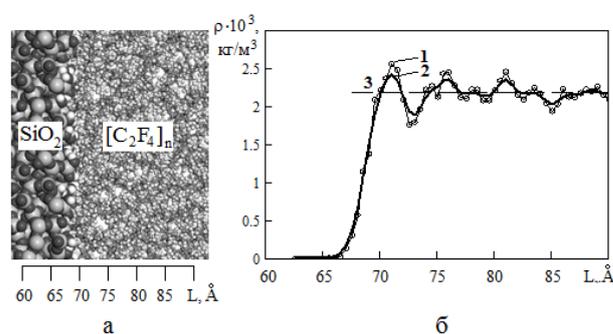


Рис. 2. Результаты моделирования системы «ПТФЭ + диоксид кремния»: а — фрагмент модельной системы при $T = 300$ К; б — зависимость плотности ПТФЭ-матрицы от расстояния вблизи межфазной границы в ПКМ (1 — плотность ПТФЭ, 2 — сглаженные данные, 3 — средняя плотность ПТФЭ)

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-58-00037).

LASER ABLATION OF *E*-BEAM AND γ -RAY TREATED POLYTETRAFLUOROETHYLENE

E.M. Tolstopyatov¹ and U. Gohs²

¹Metal-Polymer Research Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus; etolstopy@mail.ru

²Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Dresden, Germany; gohs@ipfdd.de

In spite of intensive experimental and theoretical research activity the mechanism of laser ablation (LA) of polymers is not fully understood. It is explained by a wide spectrum of active decomposition products, which components are able to react rapidly among themselves and with the polymer macromolecules. These processes are complicated by optical microheterogeneity of amorphocrystalline polymers and gas-dynamic action of microjets blasting from the centers of radiation absorbance inside the sub-surface layer [1, 2]. Comprehension of the whole complex of these phenomena has also applied significance because some technologies are based on them [3, 4]. In this regard, new experimental facts are needed to enhance knowledge of the LA mechanism. LA of polytetrafluoroethylene (PTFE) modified preliminary with ionizing radiation, is the step in this direction.

Materials and methods. Commercial pure PTFE were used as laser targets. Before LA specimens were irradiated: the first lot — by γ -rays of ⁶⁰Co, the second lot — by accelerated electron beam. Subsequent laser ablation was performed using continuous wave (CW) CO₂ laser in a vacuum chamber with incessant exhaust of gaseous destruction products. The laser beam power was 40 W, the time of irradiation was 25 s. The mean ablation rate and the fiber fraction in the ablation products were calculated using the mass loss of the target and mass of produced fibers.

Result and discussion. Ablation of the most tested polymers produces a flow of gaseous products, mixed with nano- and microparticles of polymer melt, or gases only, depending on the polymer type and LA conditions. Formation of significant quantity of fibers at CW LA is the unique feature of PTFE [1]. Modification of this polymer with ionizing radiation changes its chemical structure that results in changes of its LA characteristics [1, 2].

The LA intensity of targets preliminary γ -irradiated with doses up to 500 kGy increases with raising the dose and reaches the saturation level amounts to ~ 1.5 of that of the unirradiated polymer (Fig. 1). Simultaneously the percentage of the fiber fraction in the ablation products also increases significantly, but its dose dependence obeys the more complex law.

Contrary to the above mentioned results the LA rate of PTFE preliminary *eb*-irradiated with doses up to 120 kGy demonstrated weak dependence on dose. Comparing the LA data obtained on γ - and *e*-beam treated PTFE one should take into account the fact that the dose of γ -irradiation is almost constant in all the points of the target volume, whereas that of *eb*-

irradiation is distributed essentially non-uniformly. The layer thickness ablated during one experimental run of LA is about 2.4 mm and within its limits the contribution of every microlayer to the ablation parameters corresponds to the local dose at this level. So, the values obtained after 25 s ablation are averaged on layers with different irradiation doses. The *eb*-irradiated targets exhibit almost equal ablation intensity being ablated from two sides (front and rear with regard to *e*-beam direction), but different content of the fiber fraction, in accordance with the real dose distribution.

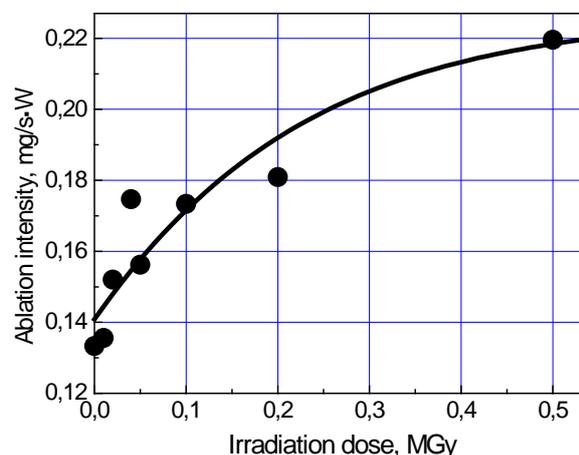


Fig. 1. Dependence of LA intensity on dose of γ -irradiation

Conclusion. Laser ablation mechanisms of γ - and *e*-irradiated PTFE are established to be qualitatively identical with respect to LA mechanism but taking into account the dose non-uniformity along the target thickness. The difference in the ablation rate between the two methods of irradiation pre-treatment is probably caused also by the dose non-uniformity along the thickness of the *eb*-treated targets. The quantitative conclusion can be made after more complex and detailed investigation.

Acknowledgements. The research was performed partially in the framework of the research program “Polymer Materials and Technologies”, task 6.04.

1. Tolstopyatov E.M. Physical Regularities of Dissociative Forming of Thin Polymer Coatings // Doct. Thesis. — MPRI NASB. — 2007
2. Tolstopyatov E.M. Ablation of Polytetrafluoroethylene Using a Continuous CO₂ Laser Beam // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2005 (38), 1993—1999
3. Grakovich P.N., Ivanov L.F., Kalinin L.A., et. al. Laser Ablation of Polytetrafluoroethylene // Rus. J. Gen. Chem. — 2009 (79), 626—634
4. Pat. RB No. 10306.

ХИМИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ВОЛОКОН ПТФЭ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПТФЭ, ПРИ ИХ НАГРЕВАНИИ ИЛИ ПОВТОРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

М.М. Гут, Е.М. Толстопятов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
gutm@mail.ru

Введение

В работе [1] дано описание процесса образования волокон ПТФЭ при действии ИК-излучения CO₂-лазера на блочный ПТФЭ в вакууме. При нагревании до 370 °С спрессованных волокон ПТФЭ они приобретают серый цвет, чего не наблюдается для исходного ПТФЭ. При действии излучения CO₂-лазера на спрессованные волокна в вакууме в отличие от исходного ПТФЭ повторного образования волокон не происходит, наблюдается свечение отдельных участков зоны абляции, а также происходит образование конденсированной фракции ПТФЭ на подложке вблизи зоны абляции.

Цель

Целью работы является описание схемы последовательных химических реакций, протекающих в волокнах ПТФЭ при их нагревании или при повторной лазерной абляции.

Результаты и обсуждение

Поскольку при нагревании до 370 °С после выдержки на воздухе спрессованных волокон ПТФЭ, полученных при лазерной абляции блочного ПТФЭ, они приобретают серый цвет, то это свидетельствует об образовании очень мелких частиц углерода. Углерод может образоваться в данном случае только в результате разложения тетрафторэтилена (ТФЭ) на углерод и четырехфтористый углерод. Однако данная реакция может протекать только при температуре выше 1000 °С, в то время как при первичной лазерной абляции блочного ПТФЭ температура в кратере абляции не превышает 550 °С и образования частиц углерода не наблюдается. Рассмотрим предпосылки, которые могут привести к существенному повышению температуры при повторной абляции спрессованных волокон ПТФЭ. Так как сами волокна ПТФЭ были вытянуты при лазерной абляции из расплава ПТФЭ газовым потоком образующегося ТФЭ и в процессе вытяжки все еще подвергались термическому распаду с образованием ТФЭ, а затем быстро остыли, то это привело к наличию внутри волокон пор с размерами порядка десятков нанометров, которые заполнены ТФЭ. Также в образованных волокнах остается множество достаточно стабильных макрорадикалов.

После извлечения волокон ПТФЭ из вакуумной камеры происходит постепенная диффузия воздуха

через тонкие стенки волокон. В результате кислород из воздуха проникает в поры, образуя смесь с ТФЭ, а также реагирует с макрорадикалами с образованием участков перфторполиперекисей. При последующем нагревании происходит разложение перфторполиперекисей с образованием дифторкарбонила и выделением тепла. Это, наряду с поглощением излучения CO₂-лазера, инициирует сильно экзотермическую реакцию ТФЭ с кислородом в порах волокон, идущую с образованием дифторкарбонила, что позволяет достичь в порах температуры более 1000 °С, достаточной для взрывного разложения оставшегося в порах ТФЭ на углерод и газообразный четырехфтористый углерод с выделением значительного количества тепла, вызывающего в свою очередь разложение и сильный разогрев ПТФЭ на внутренних стенках пор. Сильное давление образовавшегося ТФЭ вырывает капли жидкого расплава ПТФЭ, которые улетают прочь с поверхности кратера абляции, попадают на подложку вблизи зоны абляции, остывают и образуют конденсированную фракцию. Наблюдающиеся при этом участки свечения в зоне повторной лазерной абляции спрессованных волокон являются свечением раскаленных частиц углерода, образовавшихся при высокотемпературном разложении ТФЭ.

Заключение

Приведенная схема последовательных химических реакций позволяет полностью объяснить экспериментально наблюдаемые явления при нагревании или повторной лазерной абляции спрессованных волокон ПТФЭ. Показано, что данные реакции обусловлены процессом диффузии кислорода в поры волокон ПТФЭ при их нахождении на воздухе после первичной лазерной абляции блочного ПТФЭ.

Работа выполнена в рамках выполнения задания 6.04 «Плазменное модифицирование волокнистых материалов для использования в сепарационных устройствах и композитах на основе полимеров» государственной программы научных исследований «Полимерные материалы и технологии» (Республика Беларусь).

1. Красовский А.М., Толстопятов Е.М., Белый В.А. О механизме деструкции политетрафторэтилена под действием излучения CO₂-лазера // Докл. АН БССР. — 1984, № 2, 1100—1103

ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФТОРПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН В ПЛАЗМЕ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА

М.М. Гут

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; gutm@mail.ru

Введение

В работах [1, 2] дано описание способа обработки углеволокон в ВЧ-плазме электрического разряда пониженного давления, где в качестве плазмообразующего газа используется октафторциклобутан (ОФЦБ). В результате такой обработки углеволокон на их поверхности образуется островковое фторполимерное покрытие, благодаря которому улучшается совместимость этих углеволокон с ПТФЭ. Это позволило разработать композиционный материал Суперфлувис, обладающий в своем классе отличными механическими свойствами и высокой износостойкостью. Опытным путем было установлено, что наилучшие механические и триботехнические качества композита на основе ПТФЭ, армированного обработанными в плазме ОФЦБ углеволоконными, наблюдаются в случае наличия на поверхности углеволокон химически связанного кислорода.

Цель

Целью работы является описание схемы последовательных химических реакций, протекающих на поверхности углеволокон, содержащих химически связанный кислород, при действии плазмы ОФЦБ.

Результаты и обсуждение

Согласно [3], в плазме электрического разряда, возбуждаемой в ОФЦБ при пониженном давлении, имеется большой набор различных фторуглеродных ионов и радикалов, относительные количества которых сильно зависят от таких параметров, как давление, частота разряда, вводимая мощность, наличие модуляции. Из этого множества фторуглеродных продуктов, имеющихся в плазме ОФЦБ, ответственными за образование фторполимерного покрытия по механизму радикальной полимеризации являются бирадикал дифторкарбен CF_2 и трирадикал фторкарбен CF .

Химически связанный кислород на поверхности углеволокон может находиться в составе карбонильных, гидроксильных, карбоксильных и эфирных групп. Образованные в плазме ОФЦБ бирадикал CF_2 и трирадикал CF при взаимодействии с поверхностью углеволокон могут удалять кислород из кислородсодержащих групп, образуя газообразные молекулы дифторкарбонила COF_2 и радикалы фтор-

карбонила COF . Данные реакции термодинамически возможны. На поверхности углеволокон на месте удаленного таким образом кислорода образуются радикалы, которые инициируют радикальную полимеризацию путем последовательного присоединения бирадикалов CF_2 , а также трирадикалов CF . В результате получаем химически связанные с углеволоконными привитые фторуглеродные цепи, которые могут быть частично разветвлены или шиты. При последующем спекании спрессованной смеси таких углеволокон и ПТФЭ боковые привитые фторуглеродные цепи внедряются среди цепей макромолекул базового ПТФЭ, что значительно улучшает адгезионную прочность контакта модифицированных в плазме ОФЦБ углеволокон с ПТФЭ.

При наличии паров воды в вакуумной камере, где производится обработка углеволокон в плазме ОФЦБ, протекает нежелательная конкурентная реакция молекул воды с бирадикалами CF_2 и трирадикалами CF , что приводит к уменьшению концентрации этих радикалов и ухудшению условий образования фторполимерного покрытия на углеволоконках. Поскольку исходная углеткань всегда обладает некоторой влажностью, то перед плазмохимической обработкой она нуждается в тщательной сушке для удаления молекул воды, адсорбированных на поверхности углеволокон.

Работа выполнена в рамках выполнения задания 6.04 «Плазменное модифицирование волокнистых материалов для использования в сепарационных устройствах и композитах на основе полимеров» государственной программы научных исследований «Полимерные материалы и технологии» (Республика Беларусь).

1. Шелестова В.А., Гракович П.Н. Плазмохимическая обработка углеродных наполнителей в ВЧ-разряде пониженного давления // *Материалы. Технологии. Инструменты.* — 1999, № 4, 70—74
2. Шелестова В.А. Конструкционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена и модифицированных углеволокон // *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.* — Гомель. — 2002
3. Milella A., Palumbo F., Pietro F., Cicala G. Continuous and Modulated Deposition of Fluorocarbon Films by Means of $c-C_4F_8$ Plasmas. // *Plasma Process and Polymers.* — 2004, September

ОПЫТ ПРОДВИЖЕНИЯ НОВЫХ НАУКОЕМКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА

И.С. Шилько¹, Д.В. Ерохин²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
macherata@yandex.ru

²ООО «СМ-Сервис», Мурманск, Россия; sm-servis@bk.ru

В настоящее время предприятия проявляют повышенное внимание к использованию в своих технологических и производственных процессах новых наукоемких материалов. К ним относятся, в частности, разработанные в ИММС НАН Беларуси фторопластовые антифрикционные композиционные, а также фильтровальные материалы.

Как известно, труднее всего продвигать на рынок совершенно новые материалы. Процесс облегчается в том случае, когда на предприятиях уже имело место использование схожих материалов. Очевидным является предложение в те организации, которые ранее использовали в своем производственном процессе аналогичные материалы. Но, зачастую в связи с более высокой ценой на материалы нового поколения, применение их взамен уже существующих является проблематичным и требует серьезного экономического обоснования.

В связи с этим наиболее эффективным с точки зрения внедрения является работа непосредственно с разработчиками новой техники и конструкторами оборудования, которые способны в максимальной степени раскрыть и использовать все технические преимущества новых материалов. Однако этот путь имеет ограничения, т.к. доля нового оборудования невелика.

В связи с этим следующим способом продвижения является взаимодействие непосредственно с эксплуатационным персоналом — как правило, это службы Главного механика, ремонтно-механические цеха и т.п. Объемы потребления материалов в таком случае гораздо выше, нежели в объектах новой техники. Но, поскольку большинство объектов для применения фторопластовых материалов являются промышленно опасными, то ключевым моментом является получение положительных результатов и рекомендаций к применению при взаимодействии с конструкторами аналогичных машин.

Поэтому, чрезвычайно эффективным является размещение информации о новых разработках в специализированных технических (не научных) журналах, в т.ч. издаваемыми отдельными министерствами, концернами, фирмами. Как правило, опубликованная статья в таком журнале «работает» 1—2 года с момента выпуска, что требует также постоянного обновления и размещения публикаций для актуализации.

Однако наиболее эффективным методом продвижения является выступление специалистов на

конкретном предприятии, но для этого специалист должен обладать высокой квалификацией, в частности знать основы технологической схемы работы данного предприятия и принципы функционирования основных единиц оборудования, в которых могут быть применены новые материалы.

В обязательном порядке специалист должен иметь подготовленную презентацию, адаптированную под интересы сотрудников отдела Главного механика, технологов. Чисто научные вопросы в ней должны рассматриваться в минимальной степени. В обязательном порядке должен освещаться опыт применения в аналогичном или близком по конструкции оборудовании, экономическая эффективность внедрения.

Большим преимуществом работы со специалистами, непосредственно эксплуатирующими оборудование, является получение информации о стоимости, ресурсе работы аналогов, в т.ч. и импортных, что в свою очередь позволяет определить место наших разработок на рынке и грамотно сформировать технико-экономическое предложение.

Взаимовыгодный контакт устанавливается значительно быстрее, если имеется возможность организации на предприятии испытаний небольшого количества материала, представленного на безвозмездной основе. При этом нужно быть готовым к формированию серьезной, зачастую долгосрочной программы испытаний.

С этой точки зрения гораздо менее эффективными является участие в масштабных мероприятиях (выставки, форумы, ярмарки) на которых присутствуют, как правило, представители только коммерческих служб, а не инженерно-технические специалисты, являющиеся непосредственно потенциальными потребителями новой продукции.

К сожалению, как показывает практика, государственной научной организации сложно самой обеспечить весь комплекс мер по эффективному продвижению своих разработок ввиду отсутствия свободных оборотных средств на эти цели, а также отсутствия коммерческой структуры как таковой.

К вопросу внедрения и продвижения новых наукоемких материалов следует относиться с полной ответственностью, ведь только обладая всем комплексом маркетинговых инструментов можно выйти на рынок и обеспечить эффективный сбыт новой наукоемкой продукции.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ В ДЛИННОМ РЕАКТОРЕ

Н.П. Глазырин, Л.А. Калинин

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; glazyrin@tut.by

Цель работы — изучение процесса модифицирования фторполимерной (в случае травления — основной) поверхности в местах, защищённых от прямых потоков как излучения, так и активных корпускулярных частиц — продуктов плазмоллиза октафторциклобутана (ОФЦБ) в импульсном разряде. Такая постановка задачи вытекает из технологических потребностей плазмохимической обработки объектов со сложной формой поверхности, таких как волокнисто-пористые материалы, ткани и порошки.

Материалы и методы. Эксперименты по обработке поверхностей в плазме проводили на установке вакуумного напыления УВН-73П-2, оснащённой дополнительно плазмохимическим трубчатым кварцевым реактором длиной 1000 мм, внутренним диаметром 40 мм, внутренними кольцевыми электродами из медной фольги. Для питания разряда использовали два генератора (30 кГц и 50 Гц) регулируемого высокого (0,5...2 кВ) напряжения, вырабатывающих пакки импульсов длительностью 40 мс со скважностью 25. Измерение толщины обеспечивала система 23 кварцевых резонаторов с номинальной частотой 8867 кГц в металлических корпусах, закреплённых открытой торцевой стороной к выходному концу реактора на линейке равномерно с интервалом 50 мм. Резонансная частота датчиков измерялась до и после эксперимента частотомером ЧЗ-34А. В рабочем режиме давление в камере установки поддерживалось на уровне 20...24 Па путём дозированной подачи реакционного газа с использованием прибора СНА-2. Измерение давления производилось вакууметрами ВИТ-2 с термопарными датчиками ПМТ-2. Длина разрядного промежутка составляла 200 и 100 мм.

Результаты и обсуждение В закрытых от прямых потоков ячейках действуют активные частицы, вновь образованные в разрядном промежутке, но электрически нейтральные, здесь место процессам теплофизического и химического осаждения фрагментов молекул ОФЦБ, имеющих в своей структуре активированные углеродные валентности (C_4F_8 , C_4F_7 , C_4F_6 , C_4F_5 , C_2F_4 , C_2F_3 , C_2F_2 , CF_2 , CF) и поддерживающих рост полимерных цепей.

Сравнение графиков процессов 02 и 03 (рис. 1: положение кривых выше оси абсцисс соответствует росту толщины, ниже — травлению) позволяет утверждать, что имеет место конкуренция полимеризации и травления (КТП-процесс). Минимумы на полученных графиках обеспечены действием компоненты травления там (по координате длины), где

ослаблено действие компонентов полимеризации [1].

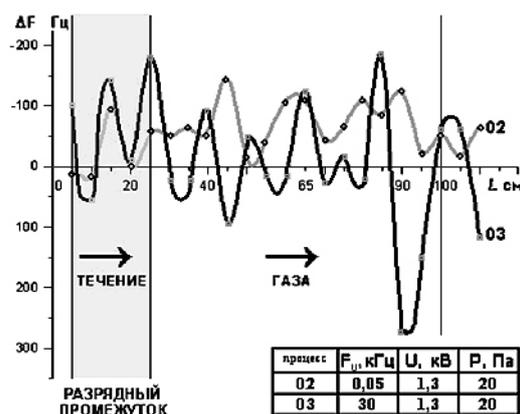


Рис. 1. Распределение изменений частоты датчиков по длине реактора в процессах 02 и 03

Травление фторполимерного слоя с переходом в газовую фазу и удалением фрагментов CF_4 , COF_2 , CO , обеспечивается атомарным кислородом (из молекулярного кислорода остаточных атмосферных газов) и атомарным фтором, образующимися в разрядном промежутке.

Для пояснения механизма образования максимумов на графиках толщины отметим, что вследствие диссоциации и нагрева газа в плазме температура смеси и концентрация фрагментов от разрядного промежутка к концам реактора монотонно снижаются. Когда реакционноспособные фрагменты данной массы при движении из разрядного промежутка к концам реактора попадают в настолько низкотемпературную зону, что для них становится возможна реакция присоединения и роста фторполимерной цепи на твердых поверхностях, то молекулы в данной точке по длине реактора осаждаются и реагируют с образованием фторполимера, образуя на графике толщины максимум. Фронт спада максимума объясняется исчерпанием материала диффузионного потока. Квазипериодичность максимумов обеспечена многообразием фрагментов, различающихся по массе в основном на величину массы фтора.

Работа выполнена в рамках задания 6.04 подпрограммы «Полимерные материалы и технологии» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии»

1. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. — М.: Мир. — 1988

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФТОРОПЛАСТА «ГРИФТЕКС»

П.Н. Гракович¹, В.В. Кудло², И.Г. Жук², И.С. Цыдик²

¹ Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

² Гродненский государственный медицинский университет, Гродно, Беларусь; kudloviktor@gmail.com

Введение. Модифицирование полимеров медицинского назначения открыло широкие перспективы в решении актуальных проблем практической медицины. Однако в отношении фторопластов возникают трудности в связи с их физико-химическими особенностями. Существующие химические и физические способы модификации фторопластов имеют существенные недостатки: отсутствует равномерность изменения поверхностной структуры, требуют использования сложных технологических процессов, изменяют структурные свойства исходного материала.

Цель — изучить особенности электронно-микроскопической структуры фторопласта «Грифтекс», модифицированного лекарственными веществами.

Материалы и методы. Для придания поверхности фторопласта новых свойств применялись лекарственные вещества — 10% раствор кальция хлорида и «Фотолон» («Белмедпрепараты», Беларусь). Первый из них использовался для придания материалу гемостатических свойств за счет ионов кальция. «Фотолон» относится к лекарственным средствам, используемым в фотодинамической терапии (молекулярный комплекс натриевой соли хлорина еб и поливинилпирролидона). Для оценки структуры поверхности модифицированного фторопласта-4 в Белорусском республиканском центре зондовой микроскопии (на базе Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси) были проведены электронно-микроскопические исследования с использованием растрового (сканирующего) электронного микроскопа (РЭМ) РЭМ VEGA II LSH (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD. Изображения снимались в режимах вторичных электронов (детектор SE) и обратно отраженных электронов (детектор BSE). С помощью системы энергодисперсионного микроанализа проводился полуколичественный и качественный анализ.

Результаты и обсуждение. На обзорных снимках с малым увеличением (линейка 200 мкм) установлено, что после проведения модифицирования волокнисто-пористого фторопласта-4 общий вид его поверхности изменялся: покрытие из фотолона и кальция хлорида консолидировало расположенные рядом фторопластовые волокна, закрывая их полно-

стью, сильно уменьшилось количество отдельных мелких деталей, характерных для исходного материала, все образцы остались пористыми, с сохранением основной структуры, которая являлась каркасом.

На снимках со средним увеличением (линейка 50 мкм) установлено, что поверхность модифицированного материала становилась похожей на «обернутую глазурью», которая находилась на всех участках материала с консолидацией мелких элементов в единые трехмерные структуры. В оцениваемом поверхностном слое четко просматривались включения размером примерно в 5 мкм.

При изучении одних и тех же участков поверхности материала, выполненного с помощью вторичных электронов (детектор SE) и обратно отраженных электронов (детектор BSE), определено, что наибольшей яркостью обладали «5-микронные элементы», находящиеся в приповерхностном слое. По нашему мнению, они представляли собой кальций и хлор — наиболее тяжелые компоненты, использованные в процессе модифицирования исходного фторопласта. Таким образом, хлористый кальций не был распространен равномерно, а концентрировался в виде кристаллов размером около 5 мкм.

На снимках с большим увеличением (линейка 20 микрон) обнаружено, что тяжёлая расплава в модифицированном фторопласте представляли собой пленкоподобные структуры. Микронного размера кристаллы не были полностью погружены в слое фотолон. Это указывает на то, что толщина покрытия не превосходила 1—2 мкм.

С помощью энергодисперсионного анализа и последующих расчетов на поверхности модифицированного фторопласта было установлено, что в нем доли волокон фторопласта, кальция хлорида в виде кристаллогидрата и фотолон составляли в среднем 51,64%, 28,9% и 19,46%, соответственно.

Таким образом, после модифицирования волокнисто-пористого фторопласта лекарственными веществами кальция хлоридом и фотолоном на его поверхности сохранялась пористая структура политетрафторэтилена, на которой формировалось сплошное покрытие по типу «глазури» толщиной около 5 мкм, состоящее из фотолон толщиной 1—3 мкм, в котором вкраплены кристаллы хлорида кальция размером до 5 мкм

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕМ

Т.И. Зубарь, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик, А.А. Рогачев

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; fix.tatyana@gmail.com

Введение. При формировании покрытий политетрафторэтилена (ПТФЭ) из продуктов электронно-лучевого диспергирования процессы полимеризации низкомолекулярных фрагментов, структурообразования макромолекул протекают одновременно при сильном влиянии поверхности подложки. На стадии адсорбции молекулярных фрагментов возможны химическое взаимодействие с атомами подложки, межмолекулярное взаимодействие и поэтому образующийся граничный слой характеризуется высокой структурной неоднородностью. Молекулярная структура, пространственная ориентация макромолекул определяют свойства наносимых покрытий [1].

Перспективным методом для оценки физико-механических свойств тонких наноструктурированных пленок являются зондовые методы исследования [2, 3]. Наноиндентирование позволяет с высокой точностью и воспроизводимостью определять локальные характеристики на поверхности и в малых объемах материалов различной природы.

Цель работы — изучение особенностей физико-механических свойств (микротвердости H и модуля упругости E) наноразмерных покрытий ПТФЭ.

Материалы и методы. Покрытия ПТФЭ наносилились из активной газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием исходных полимеров в вакууме по методу, описанному в [1]. Измерения микротвердости и модуля упругости проводились на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (США) путем внедрения алмазного индентора Берковича в поверхность пленки ПТФЭ с непрерывной регистрацией деформационных кривых зависимости глубины внедрения от приложенной нагрузки. Для каждого покрытия было выполнено 120 измерений при нагрузке, возрастающей от 15 мкН до 3 мН.

Результаты и обсуждение. Результаты исследований представляют собой зависимости микротвердости и модуля упругости от контактной глубины. При увеличении глубины внедрения модуль упругости немонотонно возрастает и на глубине 150 нм достигает значения 95 ГПа, которое соответствует экспериментально определенному модулю упругости данной подложки. Микротвердость оказалась более чувствительным параметром к структуризации макромолекул в тонких покрытиях ПТФЭ. На рис. 1 наблюдается ступенчатый характер изменения микротвердости при увеличении глуби-

ны внедрения индентора. Известно, что влияние свойств подложки на результаты измерений в случае мягкого покрытия на твердой основе начинается с глубины около 0,3 от полной толщины пленки. При толщине пленки ПТФЭ около 150 нм это соответствует участку на графиках до 50 нм. Скачкообразное изменение значений микротвердости и их постоянство на достаточно больших участках свидетельствует о слоистой структуре формируемого покрытия. По-видимому, каждый из слоев имеет свои особенности молекулярного строения. Согласно имеющимся данным поляризационной инфракрасной спектроскопии [1], вблизи подложки молекулы расположены параллельно поверхности подложки. Такой структуре соответствуют значения $E \sim 80$ ГПа, и $H \sim 2\text{—}2,5$ ГПа. В более толстых слоях формируются упорядоченные слои с преимущественной ориентацией молекул перпендикулярно поверхности подложки. Этому слою соответствуют стабильное значение микротвердости $H \sim 1,5$ ГПа. Слои, сформированный вблизи поверхности покрытия, характеризуется снижением свойств, что может объясняться отсутствием упорядоченности макромолекул.

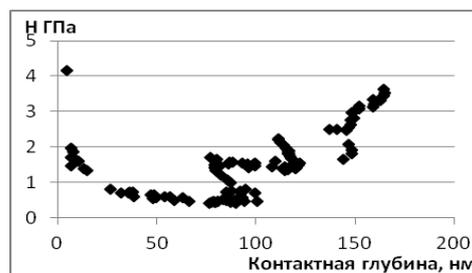


Рис. 1. Зависимость микротвердости от глубины внедрения

1. Рогачев А.А., Лучников А.П., Ярмоленко М.А., Рогачев А.В. Особенности структурообразования политетрафторэтилена при осаждении из газовой фазы // Наноматериалы и наноструктуры — XXI век. — 2015 (6), № 1, 29—40
2. Погоцкая И.В., Кузнецова Т.А., Чижик С.А. Определение модуля упругости нанопокрований методом атомно-силовой микроскопии // Механика машин, механизмов и материалов. 2011, № 3 (16), 43—48
3. Суханова Т.Е., Кузнецова Т.А., Вылегжанина М.Э., Зубарь Т.И., Диденко А.Л., Волков А.Я., Светличный В.М., Чижик С.А. Исследование пленок нанокompозитов на основе мультислойных сополиуретанимидов методами АСМ и наноиндентирования // Пленки и покрытия — 2017: Труды 13-й Междунар. конф., 18—20 апр. 2017 г. / Под ред. В.Г. Кузнецова — СПб: Изд-во Политехн. ун-та. — 2017, 291—294

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ФТОРПОЛИМЕРОВ НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

В.П. Селькин¹, А.В. Макаренко²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; selkin_v@mail.ru

²Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь

Цель. Изучение влияния армирования углеродными волокнами термопластичных фторполимеров на их триботехнические характеристики в условиях соответствующей работе контактных поверхностей запорной арматуры в нефтеперерабатывающей и нефтедобывающей промышленности, в частности при трении по стали без смазки и при режиме граничной смазки сырой нефтью при давлениях более 2 МПа.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись композиции фторопласта-2М (ПВДФ), фторопласта-40Ш (ЭТФЭ) и фторопласта-4МБ (ФЭП). Наполнитель — графитированные вискозные углеродные волокна (УВ). Образцы изготавливали в виде цилиндров с площадью поверхности трения (торцевой) — 1 см² методом литья под давлением 100—120 МПа при температуре 190—210 °С (ПВДФ) и 280—300 °С (ФЭП и ЭТФЭ). Шероховатость поверхности трения образцов — Ra = 0,25 мкм. Интенсивность изнашивания оценивали на машине трения для испытания полимеров в режиме граничной смазки [1]. Материал контртела — сталь углеродистая для трубопроводов марки А 105. Шероховатость поверхности контртела — Ra = 0,25—0,32 мкм. Скорость скольжения — 0,05 м/с. Давление на образец — 2,5 МПа. Путь трения — 5000 м (трение без смазки) и 10000 м (смазка сырой нефтью). По потере массы образцов определяли их весовой износ и рассчитывали убыль линейного размера и линейную интенсивность изнашивания.

Результаты и обсуждение. Установлено, что зависимость интенсивности изнашивания при трении по стали без смазки от степени содержания УВ носит экстремальный характер для всех исследованных марок фторсодержащих полимеров, причем оптимальные степени наполнения находятся в пределах 15—20 мас.%. На рис. 1 кривая 1 приведена зависимость интенсивности изнашивания ПВДФ от степени его наполнения УВ при сухом трении. Видно, что введение УВ в количестве 15—20 мас.% позволяет примерно в 5 раз повысить износостойкость полимера. Для ФЭП и ЭТФЭ, изначально обладающих износостойкостью меньшей, чем у ПВДФ, эта разница еще выше. Армирование УВ позволяет снизить интенсивность изнашивания по стали при сухом трении ЭТФЭ на порядок, а ФЭП на 2 порядка (табл. 1). В то же время при трении со смазкой контртела сырой нефтью такого значительного эффекта от введения в термопластичные полимеры УВ не обнаружено (табл. 1), в случае ПВДФ даже наблюдается резкое

снижение износостойкости полимера при его наполнении УВ до более чем 20 мас.% (рис. 1, кривая 2).

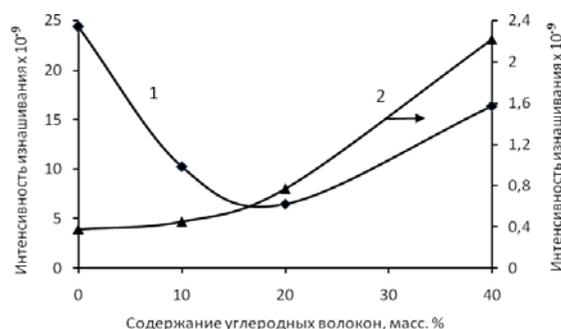


Рис. 1. Интенсивности изнашивания ПВДФ при трении без смазки (1) и в условиях смазки сырой нефтью (2) от степени его наполнения УВ

Таблица 1. Интенсивность изнашивания наполненных УВ термопластичных фторполимеров

Материал	Исходный полимер		Полимер с 15 мас.% УВ	
	Без смазки	Со смазкой	Без смазки	Со смазкой
Ф-4МБ	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Ф-40	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$5,2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-10}$
ПВДФ	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$

Выводы. Поскольку, как установлено, введение УВ не влияет значительно на коэффициенты трения исследованных материалов, можно утверждать, что основной вклад в повышение их износостойкости при сухом трении оказывают повышение модуля упругости материала и увеличение его теплопроводности. Однако с увеличением степени наполнения полимера, и, соответственно, с дальнейшим ростом его модуля упругости происходит ухудшение деформационных характеристик материала. Этот процесс может приводить к переходу от усталостного к малоциклового механизму изнашивания и снижению износостойкости полимера при его наполнении УВ выше определенного значения. Влияние изменения механических характеристик на механизм изнашивания фторполимеров на примере ПВДФ рассмотрено в работе [2].

1. Селькин В.П., Копылов С.В. Машина трения для испытания полимеров в режиме граничной смазки // Трение и износ. — 2016 (37), № 2, 234—237
2. Селькин В.П., Макаренко А.В., Скороход А.З. и др. Влияние радиационного сшивания на интенсивность изнашивания поливинилиденфторида при трении в жидкости // Трение и износ. — 2008 (29), № 1, 58—63

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПТФЭ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

М.Ю. Целуев, И.В. Коваль, Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; tseluev@gmail.com

Введение. Недостаток информации о влиянии режимов трения на триботехнические характеристики новых композиционных материалов (КМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) ограничивает область их применения, является причиной недостаточного развития практических рекомендаций по созданию эффективных конструкций изделий антифрикционного назначения.

Цель — изучение влияния нагрузочно-скоростных режимов трения на триботехнические характеристики КМ на основе ПТФЭ и модифицированных в низкотемпературной плазме углеродных волокон (УВ).

Материалы и методы. Модифицирование углеродной ткани (УТ), изготовленной из вискозных волокон, осуществляли путем плазмохимической обработки (ПХО) в среде фторсодержащих соединений [1], что обеспечивало получение на поверхности волокон УТ фторполимерной пленки с высоким сродством к ПТФЭ. Образцы из КМ на основе ПТФЭ, наполненного измельченными УВ в количестве 17 мас.%, получали по стандартной технологии, включающей измельчение УТ в дисембраторе, сухое смешение компонентов, брикетирование пресс-массы, спекание брикетов и др.

Величину коэффициента трения, интенсивность изнашивания и предельно-допустимую величину pV -критерия для КМ изучали на машине трения 2070 СМТ-1 при трении скольжения без смазочного материала по схеме трения ролик-вкладыш. Регистрацию показаний термоэлектрического преобразователя, установленного в теле вкладыша, при помощи потенциометра регистрирующего КСП-2 обеспечивала непрерывный контроль температуры на расстоянии 1 мм от поверхности трения. При исследовании величины коэффициента трения и предельно допустимого значения pV -критерия осуществляли варьирование скорости скольжения V вкладыша из КМ по стальному контртелу в интервале 0,5...2,0 м/с и давления p в контакте пары трения от 0,24 до 4,93 МПа. В процессе испытания КМ на износостойкость скорость скольжения составляла 1 м/с, давление в контакте пары трения — 2 МПа, продолжительность испытания — 4 ч. В качестве предельно допустимого режима работы пары трения принимались условия трения, при которых наблюдалось необратимое изменение геометрических параметров вкладыша, вызванное пластической деформацией КМ.

Результаты и обсуждение. В рассмотренном

диапазоне изменения нагрузочно-скоростных режимов трения температура в контрольной точке вкладыша из КМ находилась в прямой зависимости от величины pV -критерия и составляла от 95 до 214 °С. Установлено, что влияние скорости скольжения и температуры на величину коэффициента трения КМ выражено значительно меньше, чем величины давления в контакте пары трения.

Как видно из данных, приведенных на рис. 1, величина коэффициента трения КМ при давлениях в контакте пары трения от 0,24 до 2,0 МПа находится в обратной нелинейной зависимости от величины p и изменяется от 0,57 до 0,08...0,14. При давлениях свыше 2 МПа величина коэффициента трения КМ практически не зависит от величины p составляет 0,08...0,14.

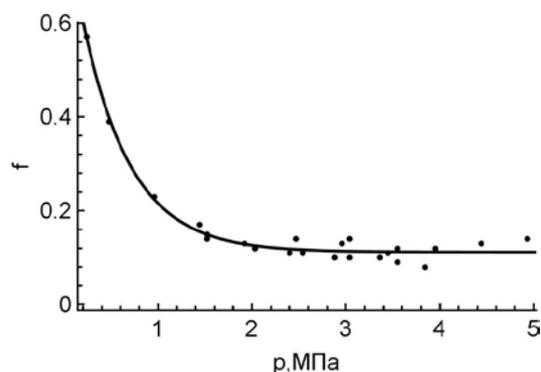


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения КМ по стали от величины давления во фрикционном контакте

Предельно допустимое значение pV -критерия $[pV]$ для КМ не является постоянной величиной и для исследованных режимов трения изменяется от 2,5 до 6,0 МПа·м/с. Получена зависимость величины $[pV]$ от скорости скольжения V (м/с) вкладыша из КМ по стальному контртелу:

$$[pV] \leq 1,35 + 2,47 \cdot V, \text{ МПа} \cdot \text{м/с}. \quad (1)$$

Интенсивность изнашивания КМ в исследованном режиме трения составила $4,1 \cdot 10^{-9}$, что в 2,5 раза ниже, чем величина этого параметра для антифрикционного материала Ф4К20 в сопоставимых условиях трения.

1. Шелестова В.А. Плазменное нанесение фторполимерного покрытия на углеродные волокна для улучшения свойств фторопластовых композитов // *Материалы. Технологии. Инструменты.* — 2010 (15), № 2, 39—51

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ

М.Ю. Целуев, В.А. Шелестова

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, tseluev@gmail.com

Введение. Композиционные материалы (КМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) находят широкое применение при изготовлении поршневых колец газовых компрессоров, а также уплотняющих прокладок, колец и манжет неподвижных и работающих с относительно невысокими скоростями скольжения соединений узлов оборудования для химической и нефтегазовой промышленности. Заданный комплекс требований, предъявляемый к характеристикам КМ в различных условиях эксплуатации, обеспечивается путем вариаций состава, операций и режимов технологического процесса их изготовления. Например, применение плазменно-химической обработки (ПХО) позволяет повысить физико-механические характеристики КМ за счет улучшения адгезионной связи частиц наполнителя с матричным полимером [1].

Цель — изучение зависимости физико-механических характеристик КМ, на основе ПТФЭ, от содержания измельченных углеродных волокон (ИУВ), прошедших ПХО.

Материалы и методы. ПХО углеродной ткани (УТ) в среде октафторциклобутана осуществляли на установке УВН, оснащенной генератором низкотемпературной плазмы и механизмом перемотки УТ, по технологии, описанной в [2]. ПХО обеспечивала получение на поверхности волокон УТ тонкой (60...70 нм) фторполимерной пленки с высоким сродством к ПТФЭ [3]. Образцы из КМ на основе ПТФЭ, содержащие 1...17 мас.% ИУВ, получали по стандартной технологии, включающей измельчение УТ на дисмембраторе, механическое сухое смешение компонентов, холодное брикетирование пресс-массы, спекание брикетов и др. [1].

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69 на аналитических весах GX-1000, оснащенных комплектом GX-13. Модуль упругости и условное напряжение при 5%-ой относительной деформации изучали методом сжатия образцов между плоскопараллельными стальными плитами на универсальной испытательной машине Instron 5567 согласно ГОСТ 4651-82 и ГОСТ 9550-81. Предел прочности КМ исследовали методом растяжения кольцевых образцов с учетом рекомендаций ГОСТ 25.603. Интенсивность изнашивания КМ определяли на машине трения 2070 СМТ-1 при трении скольжения без смазочного материала по схеме трения ролик-вкладыш.

Результаты и обсуждение. Результаты исследова-

ний показали, что величина плотности ρ КМ находится в обратной зависимости от содержания x (мас.%) ИУВ и описывается выражением:

$$\rho = 2180 - 10,9x, \text{ кг/м}^3. \quad (1)$$

Экспериментально наблюдаемые значения плотности ниже, чем теоретические оценки, предсказанные по аддитивной модели, что свидетельствует о наличии воздушных пор в объеме КМ. Выполненные оценки показали, что при изменении содержания ИУВ от 10 до 17 мас.% содержание пор увеличивается от 0,4 до 1,0 об.%. Установлен монотонный рост модуля упругости и напряжения сжатия образца с ростом концентрации ИУВ в КМ. Величина модуля упругости E КМ в исследованном интервале изменения содержания ИУВ может быть определена по зависимости:

$$E = 489 + 21x, \text{ МПа}, \quad (2)$$

а напряжения сжатия $\sigma_{0,05}$:

$$\sigma_{0,05} = 14,4 + 0,4x, \text{ МПа}. \quad (3)$$

С повышением количества ИУВ от 10 до 17 мас.% предел прочности КМ при растяжении снижается от 25,0 до 24,2 МПа, что объясняется увеличением пористости КМ.

Показано снижение интенсивности изнашивания КМ от $30,0 \cdot 10^{-9}$ до $4,0 \cdot 10^{-9}$ при увеличении содержания ИУВ. Установлено, что увеличение содержания ИУВ в интервале 10...17 мас.% оказывает меньшее влияние на прирост износостойкости КМ, чем аналогичное изменение количества ИУВ при содержании наполнителя до 10 мас.%. По результатам исследований определены перспективные составы КМ для изготовления поршневых колец газовых компрессоров; уплотняющих прокладок, колец, манжет и др.

1. Шелестова В.А., Гракович П.Н., Данченко С.Г. Композит Суперфлувис и его применение в узлах трения // Вопросы материаловедения. — 2012, № 4, 210—216
2. Шелестова В.А. Плазменное нанесение фторполимерного покрытия на углеродные волокна для улучшения свойств фторопластовых композитов // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2010 (15), № 2, 39—51
3. Шелестова В.А., Жандаров С.Ф., Данченко С.Г., Гракович П.Н. Модифицирование поверхности углеродных волокон фторполимером в низкотемпературной плазме // Физика и химия обработки материалов. — 2014, № 4, 12—19

ВЛИЯНИЕ ФТОРОРГАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ УГЛЕКОМПОЗИТОВ

Е.С. Петухова¹, П.Н. Гракович²

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия; evgspar@rambler.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Эксплуатационные свойства армированных полимерных композиционных материалов определяются, прежде всего, прочностью адгезионного взаимодействия в системе волокно/полимер. Среди разнообразных методик, обеспечивающих улучшенное совмещение волокон и полимера, большое распространение получили методы плазмохимической обработки волокон. В данной работе в качестве наполнителя для получения дисперсно-армированных полиэтиленовых (ПЭ) композиционных материалов использовали углеродные волокна (УВ) ЛО-1-12Н/40 (ОАО «СветлогорскХимволокно», Беларусь), в том числе, волокна марки «Белум», содержащие на своей поверхности фторполимерную пленку, полученную методом плазмохимической обработки в среде фторорганических соединений.

Электронно-микроскопические исследования показали, что визуально рельеф исходных и модифицированных волокон не отличаются друг от друга. Однако анализ поверхности с использованием рентгеноспектральной насадки для элементного анализа позволяет выявить фтор (рис. 1).

В табл. 1 представлены результаты исследования физико-механических характеристик ПЭ композитов, содержащих исходные и модифицированные волокна. В качестве полимерной матрицы использовали ПЭ марки ПЭ2НГ11 (ОАО «Казаньоргсинтез», Россия).

Установлено, что введение в ПЭ матрицу 10 мас.% волокон марки «Белум», позволяет повысить прочность материала при пределе текучести на 18% и модуль упругости на 36%. При введении исходного волокна в полиэтилен, также наблюдается некоторый рост указанных характеристик, но не столь значительный, как в случае использования модифицированного волокна.

Результаты электронно-микроскопических исследований границы раздела волокно/полимер представлены на рис. 2.

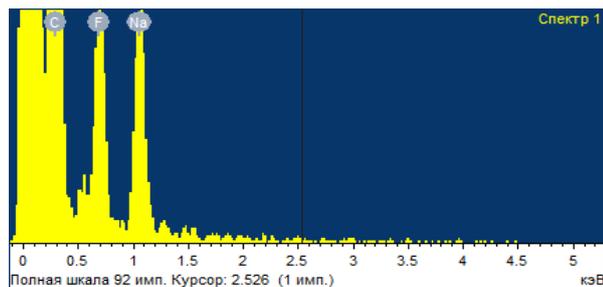


Рис. 1. Спектр распределения элементов на поверхности волокна марки «Белум»

Таблица 1. Физико-механические характеристики полиэтиленовых композитов

№	Массовая доля волокон, %	σ_T , МПа	σ_p , МПа	ϵ_p , %	ϵ_T , %	E, МПа
1	—	21,2	26,5	712,5	9,2	1059,8
2	5% исх. УВ	22,2	14,6	114,2	7,6	1226,3
3	10% исх. УВ	22,4	—*	15,2	5,6	1322,3
4	5% «Белум»	23,5	—*	45,7	7,4	1229,6
5	10% «Белум»	25,0	—*	13,9	5,6	1446,1

* — разрыв образцов происходил до достижения плато текучести; σ_T — прочность при пределе текучести; σ_p — прочность при разрыве; E — модуль упругости; ϵ_T — удлинение при пределе текучести; ϵ_p — удлинение при разрыве

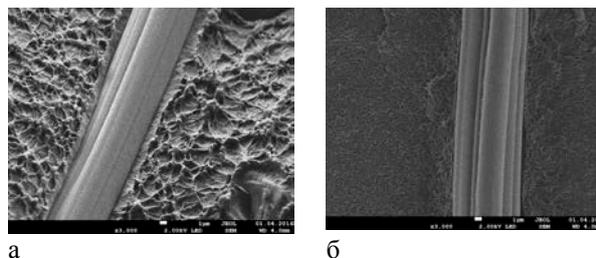


Рис. 2. Микрофотографии композитов: а — ПЭ + исх. УВ; б — ПЭ + «Белум»

Видно, что характер низкотемпературного скола композитов с исходным и модифицированным УВ существенно различается. Разрушение на границе раздела в композите с исходным УВ происходило вязко, а поверхность волокна полностью сохранила исходные рельефные характеристики. Разрушение композитов, содержащих УВ марки «Белум», происходило более хрупко, однако на самом волокне в желобках обнаруживаются фрагменты полиэтилена, что свидетельствует о том, что на отдельных участках прочность адгезионного взаимодействия выше когезионного, что и объясняет рост прочностных характеристик композита в целом. Вероятно, пониженная поверхностная энергия волокон марки «Белум» обеспечивает лучшее смачивание волокна полимером, его проникновение в рельефные образования, и, как следствие, более прочную адгезионную связь между компонентами композита.

Таким образом, выполненное исследование выявило перспективность использования углеродного волокна, подвергнувшегося плазмохимической обработке в среде фторорганических соединений для получения полиэтиленовых композитов с повышенными физико-механическими характеристиками. Механизм влияния проявляется в улучшении межфазного взаимодействия за счет лучшего смачивания волокна расплавом полимера в процессе изготовления композитов.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 6

Механика полимерных композитов и моделирование

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СОПОЛИМЕРОВ ЭТИЛЕНА

В.В. Коврига

ООО «Группа Полимертепло», Москва, Россия, kovriga@polyplastic.ru

Сополимеры этилена, в настоящее время, составляют основу производства трубных марок, применяемых для производства газовых, водопроводных и тепловых труб. При этом активно используются октенный, бутеновый и гексеновый сополимеры.

Анализ возможных периодов эксплуатации изделий из сополимеров этилена базируется на их способности к пластическому разрушению.

Установлено, что пластические разрушения сополимеров этилена характеризуется показателем естественной кратности вытяжки, который проявляет характерную для перехода к пластическому разрушению величину деформации, возникающую внезапно при образовании шейки [1]. Для сополимеров этилена величина естественной кратности вытяжки колеблется в пределах от 3—7. Возникновение естественной кратности вытяжки и локального сужения шейки показывает, что при переходе к пластическому разрушению существует большой интервал, практически не реализуемых деформаций. Нижние границы которых являются деформацией при пре-

деле текучести, а верхней границей-деформации определяемые естественной кратностью вытяжки.

Существование такого огромного объема нереализуемых деформаций прямо связано с реализацией структурного перехода в процессе пластического разрушения и, по нашему мнению, является важнейшим критерием сохранения работоспособности материала.

Важно отметить, что при этом резко меняется соотношение поверхности к объему, который сохраняется, практически, на протяжении всего периода эксплуатации материала, что позволяет использовать этот показатель в качестве важнейшей структурной характеристики материала [2].

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. — Долгопрудный: Интеллект. — 2010
2. Волинский А.Л., Бакеев Н.Ф. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твердых полимеров. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 2014

ПЛАСТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ С РАЗЛИЧНЫМИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Г. Колбая, В.В. Коврига

ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», Москва, Россия; kovriga@polyplastic.ru

Цель

Определение параметров зоны пластического разрушения при одноосном и двухосном нагружении.

Материалы и методы

Для определения параметров были выбраны трубные марки полиэтилена с различными значениями естественной кратности вытяжки, ЕКВ.

Была разработана методика определения ЕКВ при двухосном растяжении труб и одноосном нагружении.

Результаты и обсуждение

Определены значения ЕКВ при двухосном и одноосном нагружениях. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения ЕКВ

Марка ПЭ	ЕКВ при двухосном растяжении	ЕКВ при одноосном растяжении
ПЭ100 Н1000РС	5,3	5,0
ПЭ100 2НТ11-9	5,3	5,4
ПЭ80 РЕ4РР25В	5,7	6,0
ПЭ100 CRP100	6,7	6,9

Представляло интерес понять, приводят ли

структурные изменения, которые происходят при формировании ЕКВ, к резкому увеличению жёсткости материала. Для этого были измерены модули, результаты в табл. 2.

Таблица 2. Значения модулей

Марка ПЭ	ЕКВ	Предел текучести, $\delta_{т}$, МПа	Деформация при пределе текучести, ϵ , %	Модуль в исходном материале, Е1, МПа	Модуль в шейке, Е2, МПа	Соотношение Е2/Е1
ПЭ100 Н1000РС	5,4	20,3	8,9	967,6	1274,5	1,3
ПЭ80 РЕ4РР25В	5,9	18,0	12,3	817,2	1270,4	1,6
ПЭ100 CRP100	6,6	21,2	10,3	1058,0	482,7	0,5
ПЭ100- RC CRP100RC	4,6	20,9	11,0	856,1	1079,6	1,3

1. Колбая В.Г., Коврига В.В. Пластическое разрушение в полиэтиленовых трубах с различным рабочим ресурсом // Полимерные материалы и технологии. — 2016 (2), № 4, 51—56
2. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология: Научное издание — Долгопрудный: Интеллект. — 2010, 29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ТОПОГРАФИИ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ МЕТОДОМ РАЗДИРА АРМИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.С. Васильева¹, Д.А. Черников², Н.В. Прокопьев², Е.И. Зайцева², В.В. Коврига¹

¹ООО «Группа Полимертепло», Москва, Россия; www.polymerteplo.ru

²ООО «Группа Полипластик», Москва, Россия

Для оценки прочности стенки тепловых трубопроводов разработан метод раздира армирующим элементом [1]. Однако, этот метод не удается использовать для анализа прочности некоторых видов сварных соединений.

Цель работы — разработка усовершенствованного метода испытаний на раздир армирующим элементом, позволяющего оценивать прочностные свойства материалов в сварном шве и околошовной зоне. Метод базируется на определении сопротивления раздиру участка сварного соединения между двумя отверстиями, рис. 1

С использованием метода проведена оценка характера распределения прочности по площади стыка сварного соединения, которая показала, что распределение прочности по площади стыка неоднородно. Существуют зоны с высокой прочностью, близкой по прочности к исходному материалу и зоны ослабленного сечения.

Метод применен для анализа механических свойств в зоне сварных соединений толстостенных труб, разрушенных по методу изгиба.

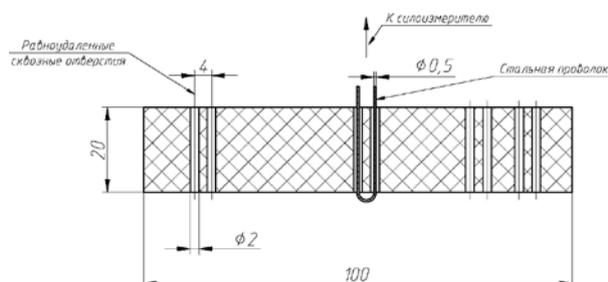


Рис. 1. Схема испытания. Поперечное сечение сварного шва. Расположение армирующего элемента (стальная проволока) в процессе резания.

С помощью определения сопротивления раздиру оценена прочность материала в околошовной зоне.

1. Стандарт организации СТО 73011750-009-2012 Пластмассы. Метод определения сопротивления раздиру армирующим элементом при различных температурах на раздвоенных образцах
2. Коврига В.В., Бисерова Н.В., Колбая В.Г., Пендик С.С., Сергеев В.И., Князькина И.В. Новые методы и результаты оценки механических свойств пластмассовых труб и материалов // Пластические массы. — 2016, № 3—4, 5—12

“ALTERNATIVE” METHOD OF PULL-OUT TEST EVALUATION WITH REAL SPECIMEN GEOMETRY

S.F. Zhandarov¹ and E. Mäder^{2,3}

¹“V.A. Bely” Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus;
serge.zhandarov@gmail.com

²Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Dresden, Germany

³Institute of Materials Science, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

Pull-out test is probably the most popular tool for bond strength measuring between fibers and matrices. However, its effectiveness strongly depends on the method of data reduction, i.e., treatment of experimental force—displacement curves recorded during the test. Data reduction determines the adequacy of the measured interfacial parameters, their accuracy and reproducibility. As is known, the main parameters characterizing interfacial strength in the “stress-based” approach are local interfacial shear strength (IFSS), τ_d , and interfacial frictional stress, τ_f . During the last few years, we proposed several models intended for improving the accuracy of determination of these parameters. In particular, instead of τ_d calculation from the kink point corresponding to the onset of debonding (which is often hardly discernible in the force—displacement curves), we determined first the interfacial frictional stress, τ_f , from the post-debonding segment of the curve and then calculated τ_d from this τ_f value and the peak force, F_{\max} , reached during the test (“alternative method” [1]). This calculation is based on our model which represents F_{\max} as the function of the embedded fiber length [2]. In the other work [3], the popular approximation of the matrix droplet shape as an “equivalent cylinder” was replaced by a set of thin parallel platelets in order to calculate stress profiles in real specimens and, in particular, estimate the effect of meniscus on the shape of the force—displacement curves.

In this paper, force—displacement curves recorded for E-glass fiber / Araldite LY556 epoxy matrix system were treated using both alternative method and platelet partitioning. Before testing, photographs of the specimens were taken, which were then used to determine the required specimen dimensions as well as the wetting angle of the meniscus. Stress profiles along the interface were calculated using a shear-lag approach with corrected Nayfeh’s stress transfer parameter [4], which enabled calculation of interfacial shear stress for any fiber volume fraction, up to 100%. The platelet partitioning was used to analyze the real specimen shape from the photographs (with the wetting cone angle of about 30°) as well as its popular approximations such as spherical segment (without meniscus) and equivalent cylinder. We also studied the effect of errors in the specimen shape determination and embedded length measurement on the calculated τ_d value. The calculation results are presented in Table 1.

Table 1. Calculated τ_d values for different specimens

Specimen	τ_d , MPa
Real shape: wetting angles on the fiber and on the substrate $\approx 30^\circ$, $D = 5.8$ mm	79.05
Equivalent cylinder	78.11 (–1.2%)
Spherical segment without meniscus	76.28 (–3.5%)
30° on the fiber, 90° on the substrate, $D = 2.9$ mm	81.25 (+2.8%)
Real shape, $l_e + 10\%$	74.97 (–5.2%)
Equivalent cylinder for the previous specimen	74.58 (–5.7%)
Spherical segment, $l_e + 10\%$	72.77 (–7.9%)

As can be seen, the calculated local IFSS is very sensitive to the value used for the embedded fiber length, l_e . At the same time, underestimation of the droplet diameter by 50% changed the calculated τ_d by less than 3%, and equivalent cylinder approximation — only by $\approx 1\%$. The last fact is well illustrated by the curves in Fig. 1; in spite of huge difference between crack propagation rates at the first stage, these are very close for both specimens near the peak force and then up to pull-out completion.

Thus, the alternative method can be combined, without considerable errors, with the fast and simple equivalent cylinder model (in the “traditional” approach this results in 20—25% error in τ_d [1]). At the same time, in order to ensure good accuracy, the embedded fiber length should be measured very carefully.

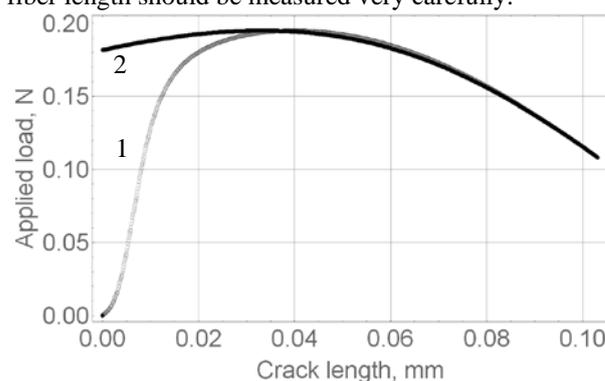


Fig. 1. Relationships between the crack length and applied load for real-shaped droplet (1) and the equivalent cylinder (2)

1. Zhandarov S. and Mäder E. // Int. J. Adhesion Adhesives. — 2014 (55), 37—42
2. Zhandarov S. and Mäder E. // J. Adhesion Sci. Technol. — 2005 (19), 817—855
3. Zhandarov S. and Mäder E. // J. Adhesion Sci. Technol. — 2014 (28), 65—84
4. Kim B.W. and Nairn J.A. // J. Mater. Sci. — 2002 (37), 3965—3972

ON THE RANGE OF EMBEDDED FIBER LENGTHS IN THE “INDIRECT” APPROACH TO LOCAL INTERFACIAL SHEAR STRENGTH DETERMINATION IN THE MICROBOND AND PULL-OUT TESTS

S.F. Zhandarov¹, P.N. Grakovich¹, and U. Gohs²

“V.A. Bely” Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus;
serge.zhandarov@gmail.com

²Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Dresden, Germany

The “indirect” approach to local interfacial shear strength (IFSS) (τ_d) determination in the microbond and pull-out tests [1] consists in measuring the maximum pull-out force, F_{\max} , as a function of the embedded length, l_e , over a wide l_e range followed by fitting the obtained experimental relationship by a theoretical curve [2] using a non-linear least squares method with two fitting parameters, τ_d itself and the interfacial frictional stress, τ_f , between the fiber and the matrix. This approach has been proposed in order to estimate τ_d when force—displacement curves were not recorded during the test so that interfacial strength parameters could not be calculated directly from characteristic points in these curves. However, the comparison of results obtained by direct and indirect methods for the same systems has showed that they are not always in agreement, even for wide ranges of embedded lengths and large numbers of specimens [3]. The aim of this paper was to analyze the sources of possible errors inherent in the indirect method and to draw up guidelines how to avoid these.

The $F_{\max}(l_e)$ relationships were generated using computer simulations for specified mean values and variances of interfacial parameters to be determined (τ_d and τ_f) and different fiber diameters and matrix droplet shapes (cylinder, spherical segment, ellipsoidal droplet on a fiber). Our analysis revealed that for cylindrical specimens a certain “frictional length”, l_f , exists, which divides the whole range of embedded fiber lengths into two segments. For $l_e > l_f$, the peak force is reached at a final interfacial crack length, and thus the F_{\max} value depends on both local IFSS, τ_d , and the interfacial frictional stress, τ_f . However, for $l_e < l_f$ the maximum force is independent of τ_f , since it is reached at zero crack length. Therefore, in the former case the sum of the least squares has a clear point minimum, while in the latter case the interfacial frictional stress remains indeterminate (Fig. 1).

Theoretical analysis shows that the frictional length, l_f , depends on the following four parameters: τ_d , τ_f , residual thermal stress τ_T and the shear-lag parameter β . For cylindrical specimens with constant ratio of matrix and fiber diameters, these parameters do not depend on l_e , so that the frictional length is strictly determined. In specimens having other shapes, β varies with l_e , and the division of the range of embedded lengths is more intricate. In particular, for small ellipsoidal droplets on a fiber (microbond test) the peak force can be independent of τ_f over a segment $l_0 < l_e < l_f$, where $l_0 > 0$. The behav-

ior of large droplets in the shape of a spherical segment (pull-out test) is qualitatively similar to that of cylindrical specimens.

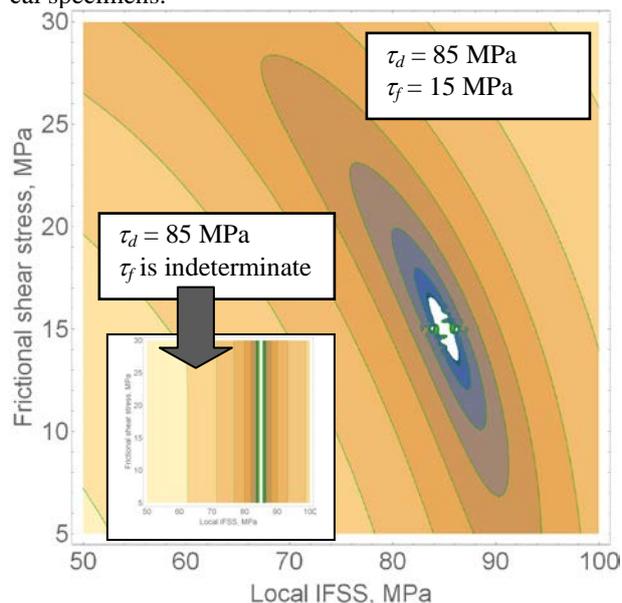


Fig. 1. Contour plot of the sum of the least squares as a function of τ_d and τ_f for 1000 virtual cylindrical specimens. The ranges of the embedded lengths are 1.5 to 3 mm (main plot) and 0.5 to 1 mm (inset). The frictional length is 1.44 mm

Our computer simulation also revealed the following features characteristic of τ_d and τ_f determination using the indirect approach:

- the narrower the l_e range, the greater is the uncertainty in τ_d и τ_f values (even if $l_e > l_f$);
- for small frictional length ($l_e \gg l_f$), τ_d value is indeterminate, while τ_f can be measured reliably;

the optimum l_e range for reliable τ_d and τ_f estimation is the interval from l_f to $(2...3)l_f$, if there is no fiber break before complete pull-out. The l_f value should be estimated in a small number of preliminary tests. If there is no task to measure τ_f accurately, specimens with $l_e < l_f$ can also be used.

In addition, it is very important to test a sufficient number of specimens (typically 40—50).

1. Zhandarov S., Mäder E., and Yurkevich O.R. // J. Adhesion Sci. Technol. — 2002 (16), 1171—1200
2. Zhandarov S. and Mäder E. // J. Adhesion Sci. Technol. — 2005 (19), 817—855
3. Zhandarov S. and Mäder E. // Compos. Sci. Technol. — 2005 (65), 149—160

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ С НЕИЗОМЕТРИЧНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В.И. Колесников¹, И.В. Лавров², В.В. Бардушкин²,
А.П. Сычев^{1,3}, А.А. Сычев¹, В.Б. Яковлев²

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

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия;

³Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия; alexc_sap@mail.ru

Введение. В процессе трения происходит неравномерный нагрев слоев в трибокомпозитах, приводящий к изменениям их трибологических свойств [1], поэтому исследования влияния состава, структуры и концентрации компонентов на теплопроводность композитов являются актуальными.

Цель — вычисление тензора \mathbf{k}^* эффективной теплопроводности трибокомпозита на основе связующего ЭД-20 с включениями двух видов: 1) сферические включения ПТФЭ; 2) бронзовые включения в форме вытянутых или сжатых сфероидов фиксированной ориентации.

Метод решения. Задача решается методом самосогласования как частного случая обобщенного сингулярного приближения [2]; при этом тензор \mathbf{k}^* находится из уравнения

$$\mathbf{k}^* = \left\langle \mathbf{k}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}\mathbf{k}'(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \left\langle (\mathbf{I} - \mathbf{g}\mathbf{k}'(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} — единичный тензор 2-го ранга; $\mathbf{k}(\mathbf{r})$ — локальный тензор теплопроводности в композите; $\mathbf{k}'(\mathbf{r}) = \mathbf{k}(\mathbf{r}) - \mathbf{k}^*$; \mathbf{g} — тензор, связанный с конкретным эллипсоидальным включением, формулы для компонент которого (при совпадении осей эллипсоида с главными осями тензора \mathbf{k}^*) имеют следующий вид:

$$g_{jj} = -(k_j^*)^{-1} \tilde{L}_j, \quad j = 1, 2, 3; \quad g_{ij} = 0, \quad i \neq j, \quad (2)$$

$$\tilde{L}_j = \frac{\tilde{a}_1 \tilde{a}_2 \tilde{a}_3}{2} \int_0^\infty \frac{dq}{(\tilde{a}_j^2 + q)[(\tilde{a}_1^2 + q)(\tilde{a}_2^2 + q)(\tilde{a}_3^2 + q)]^{1/2}}$$

— обобщенные геометрические факторы эллипсоида с полуосями a_1, a_2, a_3 (с учетом анизотропии внешней среды); $\tilde{a}_j = a_j / \sqrt{k_j^*}$, $j = 1, 2, 3$; k_j^* — главные компоненты тензора \mathbf{k}^* .

Результаты моделирования. На основе формул (1), (2) исследовались зависимости компонент тензора \mathbf{k}^* от объемной доли $f^{(2)}$ бронзовых эллипсоидальных включений (a_3 — их главные полуоси, $a_1 = a_2$); концентрация $f^{(1)}$ включений ПТФЭ считалась постоянной, равной 0,05. Уравнение (1) решалось методом простых итераций, в качестве начального приближения k_0^* принималось среднее по объе-

му. Для трибокомпозита данной структуры тензор \mathbf{k}^* получается одноосным ($k_1^* = k_2^* \neq k_3^*$). Из приведенных на рис. 1, а зависимостей видно, что для трибокомпозита с вытянутыми бронзовыми включениями компонента k_3^* , соответствующая направлению вдоль осей включений, больше компоненты k_1^* , соответствующей перпендикулярным направлениям. Для композитов со сжатыми бронзовыми включениями (рис. 1, б) имеет место обратная ситуация, т.е. $k_1^* > k_3^*$. В обоих случаях с увеличением объемной доли бронзовых включений k_1^* и k_3^* увеличиваются.

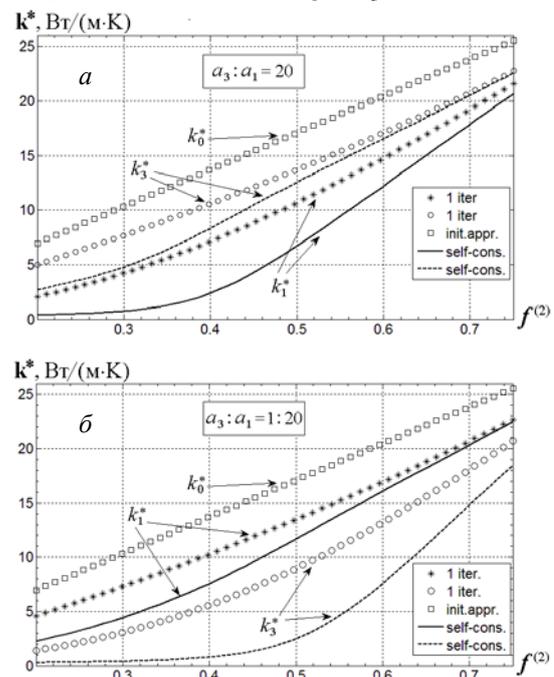


Рис. 1. Зависимости компонент \mathbf{k}^* от объемной доли бронзы в форме вытянутых (а) и сжатых (б) сфероидов, полученных как среднее по объему (init.appr.), после первой итерации (1 iter.) и методом самосогласования (self-cons.).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-08-00262-а).

1. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах. — М.: Наука. — 2003.
2. Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Лавров И.В., Сычев А.П., Яковлева Е.Н. Об объединении методов оценки эффективных диэлектрических характеристик гетерогенных сред на основе обобщенного сингулярного приближения // Доклады Академии наук. — 2013 (452), № 1, 27—31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОМ ПОЛИРОВАНИИ

М.Л. Левин, А.Л. Худолей

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Перспективным направлением в разработке управляемого процесса полирования является использование для создания полировального инструмента структурообратимых сред [1], каковыми являются магнитореологические суспензии (МРС). МРС представляют собой устойчивую взвесь ферромагнитных частиц размером 1—10 мкм в несущей дисперсионной среде. Их отличительной особенностью является возможность существенного (на несколько порядков) увеличения вязкости и пластичности при воздействии на жидкость внешнего магнитного поля. Реологическое поведение МРС в магнитном поле позволяет определить их как вязкопластичные жидкости, близкие к бингамовским пластикам. Проявление пластичности МРС в магнитном поле и положено в основу создания полировального инструмента.

Для изучения влияния реологических свойств МРС в магнитном поле на взаимодействие абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью при магнитореологическом полировании экспериментально моделировался элементарный акт их взаимодействия.

Экспериментальное моделирование по определению свойств магнитореологической полировальной композиции, которые являются доминантными в процессе абразивного съема материала обрабатываемой поверхности, проводилось на установке, со-

стоящей из системы шаров, жестко крепленных на осях, способных совершать вращательное движение. Обрабатываемую поверхность моделирует боковая поверхность конуса, сила прижатия шаров к этой поверхности моделирует объемную силу, действующую на абразивную частицу в зоне обработки. Шары являются моделью частиц абразива. Измеритель момента позволяет определить момент сил, действующих на систему шаров при их взаимодействии с вращающейся поверхностью конуса. Измерения скоростей вращения шаров, конуса и кассеты позволяют судить об относительной скорости вращательного движения “абразивных частиц” и их поступательного движения относительно “обрабатываемой поверхности”.

Выявлен сходный характер зависимостей относительной интенсивности съема материала при магнитореологическом полировании и приращения сил трения в модельном эксперименте от напряженности внешнего магнитного поля. Показано, что при магнитореологическом полировании определяющую роль в процессе абразивного съема материала играют вязкопластичные свойства магнитореологической матрицы, которые она приобретает в магнитном поле в зоне обработки.

1. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект — Минск: Наука и техника. — 1982

ФОТОДЕФЛЕКЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Г.С. Митюрин¹, Е.В. Лебедева², В.В. Кожушко³, А.Н. Сердюков¹

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; george_mityurich@mail.ru

²Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Беларусь

³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель Беларусь

В последние годы особенное внимание исследователей привлекает изучение структуры и свойств низкоразмерных сред, обладающих пространственной дисперсией, таких, например, как сверхрешетки (СР). Такие среды обладают довольно необычными физическими свойствами. Поэтому ясное понимание закономерностей физических процессов формирования низкоразмерных структур требует разработки методов неразрушающей диагностики.

К одним из достаточно эффективных методов относится метод лазерной фотодефлекционной (ФД) спектроскопии с использованием в качестве источника возбуждения бесселевые световые пучки (БСП), позволяющие увеличивать фокусную глубину результирующего сигнала [1]. Преимуществом лазерной ФД спектроскопии также является дополнительная возможность управления амплитудно-фазовыми характеристиками путем использования оптических схем с регулируемым углом конусности аксикона.

В основе лазерного ФД метода лежит преобразование поглощённой в объеме исследуемого образца световой энергии падающего пучка в тепловое поле, обуславливающее возникновение градиента показателя преломления, как в образце, так и в окружающей среде. По величине угла, на который отклоняется пробный лазерный пучок малой мощности при прохождении его через область с неоднородным показателем преломления, можно судить об оптических, диссипативных, теплофизических и других характеристиках образца.

Цель. Построение теоретической модели регистрации ФД сигнала в трёхслойной системе, состоящей из подложки, исследуемого образца и окружающей среды.

Теоретическая модель. Путём использования интегральных преобразований Фурье-Бесселя и Лапласа получено следующее выражение ФД сигнала

$$\Phi(\rho, z, t) = \frac{\pi^2 w_0}{4n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} T \times \int_0^t \frac{(\sin^2 \Omega t - 1)x}{[w_0^2 + 8\beta_S(t - \tau)]^{3/2}} e^{-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2 + 8\beta_S(t - \tau)}} \cdot e^{-\alpha_{eff}^2 \beta_S(t - \tau)} d\tau, \quad (1)$$

где β_S — эффективный коэффициент температуропроводности гиротропной СР, связанный с коэффициентом теплопроводности соотношением $\beta_S = k_S / (\rho_0 C)$; ρ_0 — плотность образца; C — удельная теплоёмкость; α_{eff} — эффективный коэффициент

поглощения сверхрешетки; w_0 — перетяжка пучка; t — время воздействия излучения; Ω — частота модуляции БСП; n_{eff} — эффективный показатель преломления СР. В выражении (1) T — распределение поля температур, которое определяется равенством

$$T = 2\pi \left[\frac{b_1^0 c_2^0 - b_2^0 c_1^0}{b_1^0 a_2^0 - b_2^0 a_1^0} e^{\sigma_S z} + \frac{a_1^0 c_2^0 - a_2^0 c_1^0}{b_1^0 a_2^0 - b_2^0 a_1^0} e^{-\sigma_S z} + e^{-\alpha_{eff} z} \right] \times \frac{A_1 [N_1 R_1(0) + N_2 R_2(0) - N_3 R_3(0)]}{\alpha_{eff}^2 - \sigma_S^2} A_0 B^{TE} e^{-r^2/w_0^2},$$

где параметром B^{TE} определяется скорость диссипации энергии бесселевых световых пучков.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученного в настоящей работе соотношения произведён численными методами. На рис. 1 изображена зависимость угла фотодефлекции от радиальной координаты ρ , рассчитанные по формуле без учёта влияния подложки, описанной в работе [2], и по формуле (1) с учётом параметров подложки. Видно, что при игнорировании влияния подложки в результате вычисления получают завышенные значения амплитуды фотодефлекционного сигнала.

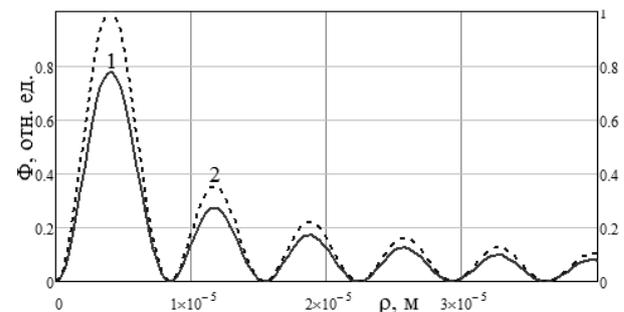


Рис. 1. Пример оформления подписи рисунка

Установлено, что значение амплитуды фотодефлекционного сигнала от гиротропной сверхрешетки сложным образом зависит от временных и поляризационных свойств БСП, а также геометрических, теплофизических, диссипативных и дихроичных параметров сверхрешетки.

1. Shi J., et al. Bessel-Beam Grueneisen Relaxation Photoacoustic Microscopy with Extended Depth of Field // Journal of Biomedical Optics. — 2015 (20), № 11, 116002-1—6
2. Митюрин Г.С. и др. Формирование фотодефлекционного отклика в гиротропной сверхрешётке, облучаемой бесселевым световым пучком // ПФМТ. — 2016 (27), № 2, 18—23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННО-АРМИРОВАННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Т.В. Рябченко¹, С.В. Шилько¹, И.В. Ермолкевич², С.И. Романович²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, rits@tut.by

²ООО «Гидромания», Минск, Беларусь

Введение

Как известно, рекордно высокие характеристики прочности и модуля упругости имеют направленно-армированные углеродные композиты (УК), обладающие выраженными анизотропными механическими свойствами. Однако недостатками таких материалов являются неравномерность передачи напряжений в адгезионном соединении «волокно — матрица» и низкая межслоевая прочность. Необходимо всесторонняя оценка механических свойств УК, разрабатываемых, в частности, в ООО «Гидромания», для оценки их применимости в ответственных конструкциях.

Методология. Деформационно-прочностные характеристики ряда однонаправленно- и ортогонально-армированных УК на различных связующих, а также одного вида стеклопластика определялись методами статических испытаний [1,2] на растяжение (полоски с накладками из стеклопластика), сжатие (многослойные трубки УК) и трехточечный изгиб (призматические пластины) на машине Инстрон 5567. В связи с высокой жесткостью образцов деформации в продольном и поперечном к оси образца направлениях регистрировались методом электротензометрии (навесным экстензометром и тензостанцией TS32L1-02 с использованием проволочных датчиков сопротивления П2КБ) (рис. 1).

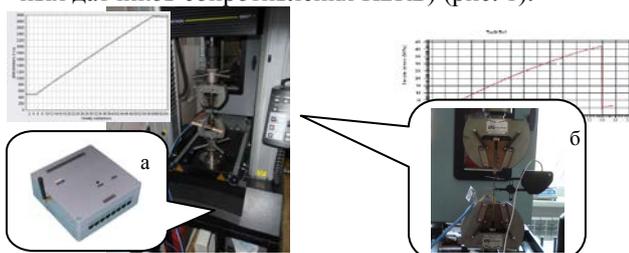


Рис. 1. Размещение испытуемых образцов в захватах машины

Результаты и их обсуждение

Для изучаемых композитов характерна линейная деформация вплоть до разрушения. Наряду с выраженным расслаиванием и веерной фрагментацией волокнистого наполнителя, проявляется эффект живучести однонаправленных УК (образцы № 1, 2, 6 на рис. 2) с поочередным разрывом волокон и перераспределением нагрузки на неразрушенные волокна. Выраженное расслоение наблюдается и при сжатии однонаправленного УК №8.

Для ортогонально-армированных УК плотного плетения (образцы № 3, 4, 7) характерно быст-

рое, практически мгновенное разрушение без расслаивания. Так, разрыв образца № 4 в основной части поперечного сечения без указанной выше фрагментации отражается на диаграммах деформирования, полученных при помощи тензостанции (рис. 1, а) и навесного экстензометра (рис. 1, б).

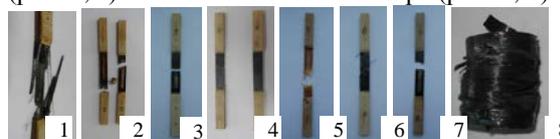


Рис. 2. Характер разрушения УК при статическом растяжении (1—7) и сжатии (8)

Роль связующего проявляется в том, что наибольший предел прочности (более 1400 МПа) и модуль упругости (более 110 ГПа) при растяжении имеют однонаправленные углепластики (образцы №№ 1 и 6), в то время как образцы № 2 с аналогичным армированием, но на другом связующем, имеют существенно меньший предел прочности 506 МПа и модуль упругости 38,7 ГПа.

Часть ортогонально-армированных материалов (образцы №№ 3, 7) имеют предел прочности $\bar{\sigma}_p > 700$ МПа, в то время как для материала № 4 с аналогичным расположением волокон значения этого показателя заметно ниже (507 МПа). Стеклопластик (образцы № 5) характеризуется существенно меньшим пределом прочности при растяжении (338,3 МПа) в сравнении с углеродными композитами.

Таблица 1. Модуль упругости, предел прочности и коэффициент Пуассона при растяжении разрабатываемых материалов

№	1	2	3	4	5	6	7
\bar{E}_p , ГПа	119,3	38,7	63,7	44,7	17,7	125,3	68,7
$\bar{\sigma}_p$, МПа	1489,7	506,0	750,0	507,0	338,3	1430,3	778,3

Коэффициент Пуассона, определявшийся на образцах в виде пластин размером 25×100 мм, составил 0,25 для тканевого и 0,34 для однонаправленного УК соответственно.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект Т16Р-202).

1. Тарнопольский Ю.М., Киндис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. — М.: Химия. — 1975
2. Пат. 6144 РБ Способ испытания материала при растяжении: Респ. Беларусь. — 2004

ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПОЗИЦИЙ КОНТАКТНОЙ МЕХАНИКИ

С.В. Шилько¹, Т.В. Рябченко¹, М.В. Зернин², Н.Н. Рыбкин²¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, shilko_mpri@mail.ru²Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, zerninmv@mail.ru

Введение

Градиентные материалы (ГМ) характеризуются выраженным пространственным изменением состава, структуры и физико-механических свойств. Это проявляется в уровне и распределении межфазных напряжений в композитах, а также напряжений в приповерхностных слоях элементов трибосопряжений при контактном нагружении (рис. 1).

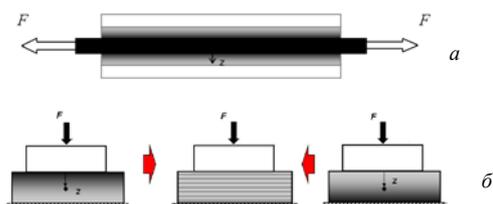


Рис. 1. Межфазный слой композита (а) и материал элемента узла трения (б) с различным по знаку градиентом свойств, условно показанным в полтонах серого цвета

Аналогично, изменение деформативности геоматериалов по глубине влияет на сдвиги тектонических плит, осадку фундаментов и энергозатраты при бурении скважин [1]. С позиций контактной механики представляются оптимальными градиенты структуры и свойств биоматериалов типа суставного хряща, где положительный градиент сопротивления сдвигу обеспечивает низкое трение, и зубных тканей, в которых, наоборот, реализуется отрицательный градиент свойств и самые прочные и твердые структурные элементы (эмалевые призмы) располагаются в зонах действия максимальных приповерхностных напряжений [2]. Таким образом, изучение ГМ важно для специалистов в области механики разрушения и трибологии, а также геологии, биомеханики и аддитивных технологий (как показано в микроэлектронике [1], последние позволяют создавать материалы с заданным градиентом свойств).

Цель работы — повышение прочности композитов, а также контактной прочности и износостойкости элементов трибосопряжений созданием оптимального градиента упругих свойств материала межфазных и приповерхностных слоев.

Методы исследования. Аналитические и численные решения контактных задач для неоднородных оснований [3], двухуровневый метод проектирования композитных конструкций [4].

Результаты и обсуждение.

Выполненные расчеты соответствовали достаточно общим схемам контактного деформирования межфазного слоя композитов и элементов узлов трения (рис. 1) из материалов с различными градиентами

по глубине z модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν . Были проанализированы контактные и эквивалентные напряжения для отрицательных $E'(z) < 0$, $\nu'(z) < 0$ и положительных $E'(z) > 0$, $\nu'(z) > 0$ градиентов названных упругих параметров, моделируемых изменением по глубине z объемного содержания дисперсного армирующего наполнителя.

В качестве расчетных примеров рассматривались фрагмент углепластика с градиентным межфазным слоем и элементы трибосопряжений в виде дискового подпятника упорного подшипника и протеза стопы, подверженного совместному контактному нагружению и изгибу.

На рис. 2 показаны распределения приповерхностных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$, а в таблице даны максимальные значения p и $\sigma_{\text{экв}}$ в подпятнике подшипника при экспоненциальном изменении модуля Юнга по нормали от поверхности контакта и $\nu(z) = \text{const}$, из которых видно существенное влияние знака $E'(z)$ на параметры напряженного состояния.

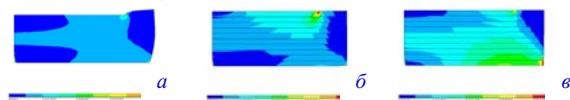


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в подпятнике из однородного материала (а) и структурно-неоднородных ГМ с отрицательным (б) и положительным (в) градиентом $E(z)$.

Таблица. Максимальные контактные давления и напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в подпятнике из обычного и градиентного материалов

	$E = \text{const}$	$E'(z) > 0$	$E'(z) < 0$
p , МПа	1,12	0,64	1,36
$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	0,44	0,45	0,64

Заключение

В докладе показана значимость формирования оптимального градиента упругих свойств материала в обеспечении межфазной прочности композитов, а также контактной прочности и износостойкости.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T16P-202).

1. Suresh S. Graded Materials for Resistance to Contact Deformation and Damage // Science. — 2001 (292), no. 5526, 2447—2451
2. Горячева И.Г., Мышкин Н.К. Трибология: тенденции полувекowego развития // Трение и износ. — 2016 (37), № 6, 665—669
3. Кузнецов Е.А. О взаимосвязи некоторых контактных характеристик с переменными упругими свойствами сопряженных тел // Трение и износ. — 1983 (4), № 2, 238—248
4. Шилько С.В., Старжинский В.Е., Петроковец Е.М., Чернус Д.А. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов. Часть 2 // Трение и износ. — 2014 (35), № 1, 52—61

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ ПРОНИ ПО ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

С.Л. Гавриленко¹, С.В. Шилько¹, Ю.К. Машков², О.В. Кропотин²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; serega48@mail.ru

²Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Для описания процессов длительного деформирования полимерных композитов отечественными и зарубежными исследователями предложен ряд моделей, учитывающих как вязкую (реономную), так и упругую составляющую. В распространенных программных продуктах конечноэлементного анализа (ANSYS и др.) используется линейная модель вязкоупругого деформирования Прони, определяющие соотношения которой имеют вид [1—3]:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{e_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} \int_0^t K(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau.$$

Здесь

$$G(\xi) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^G}}, \quad K(\xi) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^K}},$$

$$G(0) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i = \mu, \quad K(0) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i = K.$$

Для расчета параметров ядер ползучести и релаксации в каждом конкретном случае идентифицируют модель по результатам базового набора механических, как правило, статических, испытаний [3,4]. Вместе с тем, представляется эффективным привлечение метода динамического механического анализа (ДМА), реализованного в современных высокоточных и автоматизированных приборах.

Целью исследования является разработка методики идентификации модели Прони по результатам динамического механического анализа (ДМА). С использованием соотношения [2]: $\tilde{\varepsilon}(t) = \tilde{\varepsilon}_0 e^{i\omega t}$, где $\tilde{\varepsilon}_0$ — амплитуда, а ω — частота колебаний, и его подстановки в определяющие соотношения, получим выражение для напряжений в той же стационарной форме: $\tilde{\sigma}(t) = G_\alpha^*(i\omega) \tilde{\varepsilon}_0 e^{i\omega t}$, где $G_\alpha^*(i\omega) = G_\alpha^*(i\omega) = G'_\alpha(\omega) + iG''(\omega)$ — комплексная функция частоты, подлежащая определению.

В классической теории вязкоупругости [1,2] компоненты $G'_\alpha(\omega)$ и $G''_\alpha(\omega)$ называют модулями накопления (storage) и потерь (loss) соответственно. Для экспоненциального ядра сдвига ($n_G = 1$) указанные упруго-диссипативные характеристики материала описываются следующим образом:

$$G'_1(\omega) = G_\infty + \omega \int_0^\infty G_1 e^{-\frac{\eta}{\lambda_1}} \sin \omega \eta d\eta.$$

Математические преобразования (двойное интегрирование по частям и приведение подобных слагаемых) дают следующее выражение:

$$G'_1(\omega) = G_\infty + G_1 \frac{\left(\omega - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \omega \right)},$$

что позволяет методом наименьших квадратов вычислить параметры ядра сдвига при различных частотах прикладываемой нагрузки.

Для апробации предложенной методики на приборе DMA Q 800 (ИММС НАН Беларуси) по схеме трехточечного изгиба были испытаны образцы углеродного композита при 4-х частотах нагружения: 1; 3; 10; 30 с⁻¹ (рис.). Установлено, что имеющихся данных достаточно для определения параметров функции сдвига линейной вязкоупругой модели Прони с приемлемой точностью.

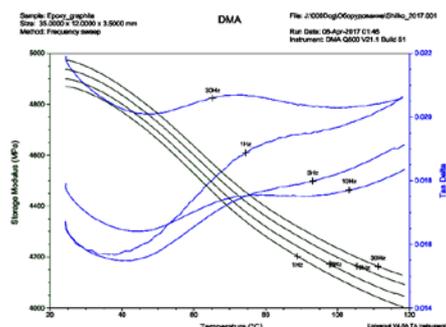


Рисунок. Зависимости модуля накопления и тангенса угла механических потерь от температуры

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта Т16Р-202 / РФФИ № 16-58-0037/16. Авторы признательны С.Н. Бухарову и В.В. Кожушко за помощь в проведении ДМА-исследования.

1. Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. — М.: Наука. — 1985
2. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. — М: Мир.— 1974
3. Гавриленко С.Л., Шилько С.В. Аттестация линейной вязкоупругой модели антифрикционного полимерного композита по результатам ускоренных испытаний на релаксацию // Теор. и прикл. механика. — 2017, № 32, 155—158
4. Машков Ю.К., Кропотин О.В., Шилько С.В., Плещачевский Ю.М. Самоорганизация и структурное модифицирование в металлополимерных трибосистемах. — Омск: Изд. ОмГТУ. — 2013

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В ПРЕПРЕГАХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.В. Василевич¹, К.А. Горелый², С.В. Сахоненко², А.В. Сахоненко²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; vasilevich@bsu.by

²Открытое акционерное общество «Авангард», Сафоново, Россия

Технология изготовления изделий из полимерного композиционного материала (КМ) включает следующие стадии процесса: формование поверхностей заданной геометрии создаваемого объекта, т.е. получение полуфабрикатов в виде слоистой структуры взаимно перпендикулярных семейств волокон (нитей) пропитанных связующим; отверждение связующего; механическую обработку поверхностей изделия с требуемой точностью.

Особый интерес представляет стадия получения полуфабриката. На этой стадии материал конструкции настолько податлив, что из него можно целенаправленно формировать заданные поверхности, а также создавать в нем такое напряженное состояние, которое в дальнейшем при эксплуатации даст положительный эффект (например, позволит снять или уменьшить остаточные напряжения).

Цель — экспериментально получить зависимость между прочностными и деформационными характеристиками в препрегах.

Материалы и методы. В дальнейшем будем считать, что полуфабрикат (препрег) представляет собой пакет слоев тканевого материала пропитанного связующим. При этом каждый слой состоит из двух взаимно-перпендикулярных и связанных между собой путем переплетения семейств нитей тканевого материала. Связующее не отверждено и находится в состоянии заданной вязкости, например, в разогретом состоянии до температуры 80 °С.

Нити в тканых препрегах являются абсолютно гибкими, они работают только на растяжение; усилие, растягивающее нить, совпадает с направлением касательной к нитям; сжатие нитей возможно только в перпендикулярном направлении к ним; в материале препрега отсутствуют напряжения изгиба; вместо касательных усилий действуют силы трения.

Следует отметить, что процесс растяжения препрегов из тканей гладкого переплетения делится на две стадии. Первая стадия соответствует изгибу и растяжению, когда искривленная нить выпрямляется и одновременно растягивается, вторая стадия — растяжению выпрямленных нитей. Таким образом, для полосы ткани свойство ее неупругости на первой стадии растяжения объясняется изгибом нитей в процессе ткачества из-за их переплетения. Для стеклотканей, применяемых в полимерных композициях, неупругая составляющая, которая характеризуется коэффициентами $\gamma_{i,j}$ ($i, j = 1, 2$), не превосходит 0,05, а упругая составляющая достигает максимального значения при разрыве нитей и равна примерно 0,02. Таким образом, пренебрежение неупругой составляющей в зависимостях (1) может привести к

значительной погрешности в определении напряженно-деформированного состояния.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов изделий, представляющих собой многослойную композицию тканевого материала и полимерного связующего (препрег) показали, что при действии внешней нагрузки зависимость между напряжениями и деформациями при растяжении описывается соотношениями

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} + \gamma_{11}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} + \gamma_{22}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{E_{12}} + \gamma_{12}, \quad \varepsilon_{21} = \frac{\sigma_{21}}{E_{21}} + \gamma_{21}.$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{21}$ и $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}, \sigma_{21}$ — относительные деформации растяжения и сжатия семейств взаимно-перпендикулярных нитей и соответствующие им напряжения; $\gamma_{i,j}$ ($i, j = 1, 2$) — постоянные, определяемые экспериментально для исследуемого препрега; E_{11} — модули упругости при растяжении и сжатии препрега. При подтверждении зависимостей (1) путем испытаний полоса ткани нагружалась поперечными растягивающими нагрузками. Затем одновременно производилось нагружение этой же полосы в продольном направлении. Такие испытания проводились на семи типах тканей гладкого переплетения. Оказалось, что на всем диапазоне нагружения продольными нагрузками при постоянной нагрузке в поперечном направлении не наблюдалось изменений деформации поперечного направления. Из этого был сделан вывод, что для тканей гладкого переплетения из многоволоконных нитей справедливы зависимости (1).

Результаты и обсуждение. Уравнения (1) представляют собой суммы упругих и неупругих составляющих деформации, причем упругая часть совпадает с представлением закона Гука для ортотропного тела [1]. Формулы (1) достоверно описывают зависимости деформаций от напряжения для стеклоткани пропитанной связующим, находящимся в фазе жидкой субстанции [2]. Для таких структур коэффициент трения между нитями в узлах переплетения достаточно мал. Этому способствует состояние незаполимеризованного связующего в ткани.

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. Изд. 2. — М.: Наука. — 1977
2. Василевич Ю.В., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Горелый К.А., Малютин Е.В. Установление закономерностей поведения ткани при сжатии // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013, № 1 (22), 166—170

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРОКЛАДКИ-ДЕМПФЕРА С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

И.Г. Горячева¹, Е.В. Торская¹, Ф.И. Степанов¹, Н.К. Мышкин², А.В. Купреев²

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Россия, torskaya@mail.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение

Долговечность сопряжений, в которых в качестве прокладок-демпферов используются полимерные материалы, зависит от свойств этих материалов, в том числе от того, как эти материалы деформируются под действием нагрузки. Результаты длительной эксплуатации и проведенных исследований [1] показывают, что конструкция и материалы рельсовых промежуточных скреплений существенно влияют на надежность работы рельсового пути и на затраты по его содержанию. Правильно сконструированные упругие прокладки благодаря своим свойствам и функциям снижают напряженно деформированное состояние всех элементов рельсового пути [2].

Цель работы — моделирование деформации текстурированного слоя рельсовых прокладок-амортизаторов из эластомерного композиционного материала в условиях контактного взаимодействия.

Материалы и методы

С использованием универсальной разрывной машины Instron 5655 были получены экспериментальные значения модуля упругости эластомерного композиционного материала ($E = 27,5 \dots 32,0$ МПа) и коэффициент Пуассона ($\mu = 0,47 \dots 0,49$), как отношение относительного поперечного сужения к относительному продольному удлинению. Испытания проводились по ГОСТ 1497-84. Для проведения расчетов были приняты средние значения при большой выборке: $E = 30,0$ МПа, $\mu = 0,48$.

Постановка задачи о сдавливании текстурированного слоя и методы решения. Рассматривался упругий слой с элементами текстуры на поверхности (рис. 1), скрепленный с жестким полупространством.

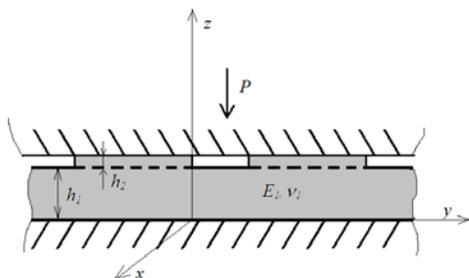


Рис. 1. Схема контакта в сечении YOZ

Слой взаимодействует с жесткой плитой, к ко-

торой приложена нагрузка P . В предположении, что плита вдавливается в поверхность слоя без перекоса, выполняется условие равенства перемещений для всех точек поверхности элементов текстуры.

Вертикальное смещение упругого слоя под каждым элементом структуры является следствием проявления эффекта взаимного влияния отдельных пятен контакта и определяется по всей поверхности упругого слоя. В случае упругого слоя задача определения перемещений решается с помощью методов, основанных на использовании двойных интегральных преобразований Фурье. Деформация элементов текстуры рассматривалась с помощью модели линейной упругости (слой Винклера). Задача об определении неизвестного распределения контактного давления по поверхности слоя решается методом граничных элементов.

Для расчетов были использованы механические свойства полимерного материала, а также учитывалась геометрия текстурированной поверхности, используемая в прокладке-демпфере.

Результаты и обсуждение

Был разработан метод определения контактного давления, возникающего при нагружении жесткой плитой текстурированного полимерного слоя конечной толщины. Проведены расчеты для полимерной прокладки-демпфера с использованием ее механических свойств и геометрических характеристик текстуры. Сравнительный анализ результатов показал, что на границах элементов текстуры происходит концентрация контактного давления, что может привести к более быстрому изнашиванию этой части поверхности. Увеличение толщины слоя приводит к увеличению неравномерности распределения давлений по элементам текстуры, а увеличение податливости элементов текстуры — к более равномерному распределению давления по поверхности каждого из элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 16-58-00085) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т16Р-054).

1. Говоруха В.В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений — Днепрпетровск: Лира ЛТД. — 2005
2. Песецкий С.С. Полимерные композиты технического назначения // Наука и инновации. — 2013, № 9, 7—10

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ СФЕРИЧЕСКОЙ НАНОЧАСТИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА В ВИДЕ ТЕТРАЭДРА

К.С. Курочка, Д.Н. Трубенюк¹

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
¹rubindnt@yandex.ru

Введение. Материалы, представляющие собой пленки и стекла, которые содержат металлические наночастицы, находят применение при создании таких объектов, как среды для регистрации оптических сигналов, оптические сенсорные элементы для селективного детектирования.

Проведение моделирования распределения электромагнитного поля базируется на решениях системы уравнений Максвелла (J.C. Maxwell) [1, 2]. В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) является универсальным с точки зрения выбора граничных условий и эффективный по времени выполнения, а также позволяет учесть неоднородность исследуемого материала. Поэтому для решения поставленной задачи был выбран этот метод [3, 4].

Материалы и методы. Напряженность электрического поля, создаваемого источником с плотностью зарядов J_{imp} в области Ω , которая характеризуется электрической ϵ и магнитной μ постоянными, может быть описана с помощью уравнений Максвелла [1, 2]:

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H; \quad (1)$$

$$\nabla \times H = i\omega\epsilon E + J_{imp}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = -\frac{1}{i\omega} \nabla J_{imp}; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mu H) = 0, \quad (4)$$

где E — напряженность электрического поля; H — напряженность магнитного поля; ω — частота источника; i — мнимая единица; ∇ — гамильтонов (W.R. Hamilton) оператор.

Дискретизацию расчетной области Ω будем проводить конечными элементами в форме тетраэдра с тремя степенями свободы в каждом узле (E_x , E_y , E_z) и будем аппроксимировать значения искоемых функций линейными полиномами:

$$E_x(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z,$$

$$E_y(x, y, z) = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z,$$

$$E_z(x, y, z) = \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z;$$

$$E = [A]\alpha, \quad (5)$$

где $[A]$ — матрица координат [1, 3],

$$E^T = \{E_x \quad E_y \quad E_z\};$$

$$\alpha^T = \{\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_{12}\}.$$

Так как выражение (3) имеет место для любой точки тетраэдра, то для его узлов получим

$$E^e = [B]\alpha, \quad (6)$$

где $[B] = [Q][A]^{-1}$, $[Q]$ — матрица деформаций [3].

Полагая что вектор E^e известен, найдем из (6) вектор коэффициентов α :

$$\alpha = [B]^{-1} E^e, \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), получим

$$E = [N^e] E^e, \quad (8)$$

$$\text{где} \quad [N^e] = [A][B]^{-1} \quad (9)$$

матрица, содержащая функции формы конкретного конечного элемента.

Электрическое поле E в области Ω может быть найдено по следующей формуле

$$E = \sum_{l=1}^{N_{uzl}} N_l E_l + \sum_{l=1}^{N_D} N_l^D E_l^D, \quad (10)$$

где N_{uzl} — число уникальных узлов в дискретизованной области; E_l — значение электрического поля в l -м узле; N_l — функция формы для l -го узла; N_D — количество узлов на Γ_D ; N_l^D и E_l^D — соответственно векторная базисная функция и значение поля на Γ_D .

Подставив (10) в вариационную форму волнового уравнения [1, 3], получим

$$\sum_{l=0}^{N_{uzl}} K_{ij} E_l = b_j, \quad j = \overline{1, N_{uzl}}, \quad (11)$$

Система линейных алгебраических уравнений (11) представляет собой основное уравнение МКЭ. Функции формы для каждого конечного элемента вычисляются по формуле (9) [1, 4].

Заключение. Предлагаемая математическая модель может быть использована для исследования распределения электромагнитного поля в ближней зоне сферической наночастицы.

1. Курочка К.С. Конечно-элементное моделирование распределения электромагнитного поля в ближней зоне сферической наночастицы // Информатика. — 2016 (52), № 4, 33—42
2. Климов В.В. Наноплазмоника. — М.: Физматлит. — 2009
3. Jianming J. The Finite Element Method in Electromagnetics. — 2nd ed. — N. Y.: Wiley. — 2002
4. Курочка К.С., Кухаренко А.А. Моделирование распространения электромагнитного поля в ближней зоне металлической частицы методом конечных элементов // Материалы VII науч. конф. «Математическое и имитационное моделирование систем (МОДС — 2012)», 25—28 июня 2012 г., Украина. — 2012, 36—39

БИМОДАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ В ПЛЕНКАХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИБЛОЧНЫХ СОПОЛИУРЕТАНИМИДОВ

В.А. Лапицкая¹, Т.Е. Суханова², Т.А. Кузнецова¹,
Т.И. Зубарь¹, А.Л. Диденко², С.А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; vasilinka.92@mail.ru

²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

Введение. Термоэластопласты на основе мультимодальных сополиуретанимидов (соПУИ) представляют интерес для современной науки и техники, так как сохраняют работоспособность при больших внешних нагрузках и перепадах температуры. Изменяя химическое строение и соотношение жестких и гибких блоков в соПУИ, можно менять структуру, морфологию, механические и термические свойства этих полимеров [1, 2]. Их модификация добавками углеродных материалов расширяет температурный диапазон эксплуатации, не снижая эластичных свойств. Поверхность соПУИ воспринимает оказываемые на объект воздействия, и поэтому ее свойства представляют повышенный интерес.

Для определения упругих свойств поверхностных слоев полимеров широко применяются зондовые методы индентирования [3].

Цель работы — определение модуля упругости пленок термоэластопластов методом наноиндентирования с построением зависимостей «нагрузка — глубина внедрения».

Материалы и методы. В работе использовались термоэластопласты на основе соПУИ (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п и (Р-ТДИ-Alt — ТДИ-Р)СОД-п. Толщина пленок составляла от 150 до 540 мкм. Для определения модуля упругости и микротвердости использовали наноиндентор 750 Ubi (Hysitron, США). Для построения зависимостей «нагрузка — глубина внедрения» на каждом образце были выполнены не менее 100 кривых индентирования при возрастающей нагрузке от 50 до 5000 мкН с шагом 50 мкН.

Результаты и обсуждение. Установлено, что матрицы (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п и (Р-ТДИ-Alt—ТДИ-Р)СОД-п кардинально различаются видами распределения модуля упругости E по глубине пленок. Наибольший диапазон значений E характерен для соПУИ (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п с бимодальным распределением модуля упругости — до 35 ГПа на глубине от 1 до 4 мкм и около 30—40 МПа на поверхности. Распределение микротвердости H при этом одномодальное — около 3 МПа. СоПУИ (Р-ТДИ-Alt — ТДИ-Р)СОД-п имеет одномодальное распределение E — около 4 ГПа и более высокую H — 450 МПа.

Широкий диапазон значений E при неизменной H соПУИ (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п объясняется наличием частично упорядоченной фазы, чувствительной как к условиям синтеза (скорость испарения растворителя), так и к поверхностным эффектам. Этот факт позволяет варьировать локализацию данной фазы добавками углеродных наполнителей. Наибольшие изменения в

упругих свойствах матрицы (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п обнаружены при добавлении 1 вес.% ОСУНТ.

Бимодальный характер распределения модуля упругости в матрице (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п при добавлении наполнителей не изменяется.

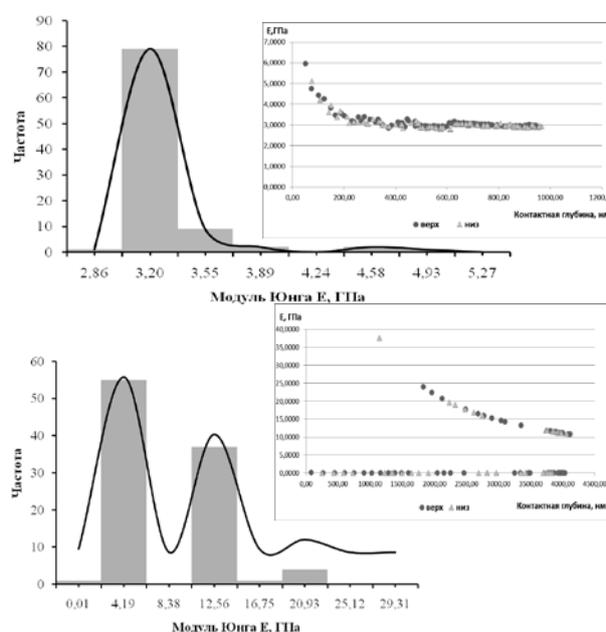


Рис.1 Виды распределение модуля упругости по значениям: а — одномодальное для матрицы (Р-ТДИ-Alt—ТДИ-Р) СОД-п; б — бимодальное для матрицы (Р-2300ТДИ-Р)СОД-п

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов БРФФИ №Ф16Р-142 и РФФИ №16-53-00178.

1. Суханова Т.Е., Вылегжанина М.Э., Кузнецова Т.А., Светличный В.М., Диденко А.Л., Ширяева Т.И., Кутин А.А., Волков А.Я., Кудрявцев В.В., Чижик С.А. Комплексная диагностика морфологии и локальных механических характеристик гибридных материалов на основе мультимодальных (сегментных) ПЭИ и MQ-смол методами АСМ и наноиндентирования // Нанозифика и нанозлектроника. Тр. XVI междунар. симп., 10—14 марта 2015 г., Нижний Новгород. — 2015, 292—296
2. Суханова Т.Е., Кузнецова Т.А., Вылегжанина М.Э., Светличный В.М., Зубарь Т.И., Чижик С.А. Возможности применения зондовых методов в диагностике наномодифицированных термоэластопластов // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. XII Междунар. конф., Минск, 18—21 окт. 2016 г. — Минск: Беларуская наука. — 2016, 8—17
3. Погоцкая И.В., Кузнецова Т.А., Чижик С.А. Определение модуля упругости нанопокрyтый методом атомно-силовой микроскопии // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011, № 3 (16), 43—48

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАСТМАСС, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОГРАММ-СЛАЙСЕРОВ

Е.В. Шалобаев¹, С.Л. Гавриленко², Ф.А. Перепелица¹, Н.С. Красноруцкая¹, Г.А. Демидов³

¹Академия ЛИМТУ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия; shalobaev47@mail.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, serega48@mail.ru

³Малое инновационное предприятие «Политех-Инжиниринг» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, demidov@compmechlab.ru

В работе поставлена задача изучения физико-механических свойств пластмасс, в частности, полилактида PLA (Polylactide), который является вторым после ABS пластиком по использованию в 3D-принтерах. Изготавливается с учетом CALS-технологии из пищевых продуктов (кукуруза, сахарные тростник и свекла), поэтому является экологичным материалом как по свойствам, так и по циклу изготовления. PLA хорошо утилизируется (биоразлагается). Гарантированный срок работы 2 года. Температура плавления составляет 180—190 °С, а стеклование происходит при 55 °С. Легко металлизуется, обладает низким коэффициентом трения, из-за чего часто используется для создания подшипников скольжения, зубчатых колес. В основном используется для быстрого прототипирования. Так, для планетарного редуктора, используемого в разработанном МИП «Политех-Инжиниринг» 3D-принтере для подачи паста- и гелеобразных материалов, используется именно PLA-пластик (рис. 1). Однако данных испытаний по определению физико-механических свойств этого материала, кроме справочных, не имелось. В этой связи проведены испытания прочности на разрыв образца — пропорционального цилиндрического, тип III, ГОСТ 1497-84 (диаметр 5 мм). Печать образцов для разрыва проводилась на 3D-принтере «Engineer V2» МИП (температура экструдера 220 °С, температура стола 60 °С, толщина слоя 0,2 мм, диаметр сопла — 0,4 мм). Пластик PLA в виде нити диаметром 1,75 мм.



Рис. 1. Двухступенчатый планетарный редуктор со снятой крышкой

Опыт проводился на серии образцов (5 штук), которые печатались в горизонтальном положении с применением технологических поддержек при использовании программ — слайсеров Cuka и Slic3r. Форма поддержек в первом случае — решетка, во втором — Rectilinear. Форма заполнения — соты.

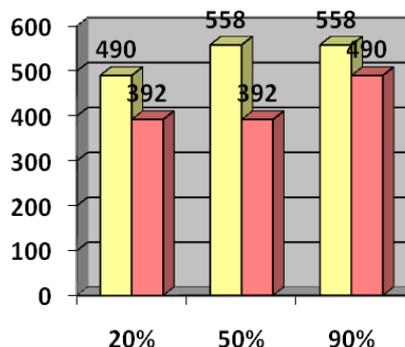


Рис. 2. Зависимость нагрузки (Н) от плотности заполнения образца материалом (■ — Slic3r, ■ — Cuka)

В результате эксперимента получено отношение прочности справочное/опытное для плотности заполнения образца 20, 50, 90% — составляет соответственно, для Cuka — 2,31; 1,93; 1,93; а для Slic3r — 2,89; 2,89; 2,31. Кроме того, выявлено, что на результат влияет геометрия формы заполнения детали материалом. В настоящее время обрабатываются данные подобных экспериментов, касающихся модуля Юнга.

Программное обеспечение 3D-принтера может влиять на качество изделий, при этом количество факторов подобного влияния достаточно высоко.

Работа выполнена в рамках Договоров о сотрудничестве между ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси с СПбНИУ ИТМО и с МИП «Политех-Инжиниринг» СПб ПУ Петра Великого. Авторы доклада участвуют в проекте создания российско-белорусского 3D-принтера, обеспеченного материалом и программным обеспечением в рамках импортозамещения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ

О.В. Гоголева¹, И.С. Шилько²

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия; oli-gogoleva@yandex.ru

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, Гомель, Беларусь

Введение. Создание конструкций узлов трения, постоянно растущие требования к эксплуатационным характеристикам машин и механизмов обуславливают необходимость разработки новых материалов триботехнического назначения и изучения роли различных факторов в процессах их трения и изнашивания. Это особенно важно для узлов трения работающих без смазочного материала. В ряде исследований подтверждается, перспективность использования в таких узлах трения композиционных материалов на основе полимеров. Таким образом, развитие исследований по разработке полимерных материалов с максимально улучшенным комплексом свойств, обеспечивающих необходимый ресурс и работоспособность узлов трения является актуальной задачей полимерного материаловедения.

СВМПЭ является уникальным полимером, обладающий высокими физико-механическими характеристиками, сравнительно низким коэффициентом трения, высокой морозо-, агрессивно- и износостойкостью, необходимыми для обеспечения работоспособности узлов трения в широком диапазоне условий эксплуатации.

Одним из перспективных способов создания материалов триботехнического назначения является введение волокнистых наполнителей. Волокнистые наполнители придают полимерной матрице высокие несущую способность, прочность, жесткость, химическую стойкость.

Результаты и обсуждение. В работе использовали СВМПЭ марки Gur-4150 с молекулярной массой 9,2 млн., в качестве наполнителей использовали химически модифицированные углеродные волокна марки «БЕЛУМ» и углеродные волокна без модификации. Образцы получали горячим прессованием при давлении 10 МПа и температуре 180 °С. Механическое перемешивание порошков СВМПЭ и УВ проводили в лопастном смесителе. Наполнители вводили в полимерную матрицу в количестве от 1 до 3 мас. %.

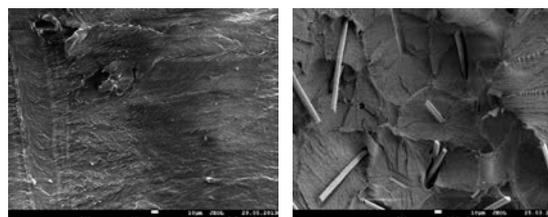
Установлено, что при наполнении СВМПЭ исходными, немодифицированными углеродными волокнами достигается улучшение физико-механических характеристик на 5—7%, в то время как скорость массового изнашивания снижается до 2,8 раз (табл. 1). При наполнении СВМПЭ модифицированным волокном «БЕЛУМ» также наблюдается улучшение деформационно-прочностных характе-

ристик до 10%, и снижение скорости массового изнашивания до 3 раз.

Установлено снижение коэффициента трения композитов, что можно объяснить уникальным триботехническим свойством углеродных волокон, выступающих в роли твердой смазки.

Таблица 1. Физико-механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ и углеродных волокон

Композит	ϵ_p , %	σ_p , МПа	E, МПа	I, мг/ч	f
СВМПЭ (Gur-4150)	280	36	858	0,46	0,30
СВМПЭ + 1 мас. % УВ	300	34,6	782	0,20	0,19—0,20
СВМПЭ + 2 мас. % УВ	300	34,3	744	0,16	0,20—0,22
СВМПЭ + 3 мас. % УВ	295	34,8	771	0,26	0,26—0,27
СВМПЭ + 1 мас. % БЕЛУМ	305	33,3	801	0,16	0,16—0,18
СВМПЭ + 2 мас. % БЕЛУМ	310	35,0	807	0,15	0,20—0,22
СВМПЭ + 3 мас. % БЕЛУМ	300	32,8	840	0,19	0,23—0,25



а

б

Рис. 1. Надмолекулярная структура исходного СВМПЭ (а), и композита на его основе, наполненного немодифицированным углеродным волокном (б)

Видно (рис. 1), что полимерная матрица не смачивает поверхность волокон, и в связи с химической инертностью немодифицированных волокон не происходит образования достаточно прочных связей между материалом-матрицей и наполнителем. В материале обеспечивается преимущественно механический контакт между волокном и СВМПЭ. В дальнейшем планируется более детальное изучение межфазного взаимодействия и структурообразования в композитах, наполненных модифицированным «Белум».

Таким образом, на основании проведенных исследований показана перспективность использования углеродных волокон в качестве армирующего элемента СВМПЭ с целью получения новых составов композитов с высокими триботехническими характеристиками, предназначенные для эксплуатации в условиях ограниченной смазки или сухого трения.

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБЕ С ПОДАТЛИВОЙ ОБОЛОЧКОЙ И ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ

В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, Е.А. Голубева, Р.А. Аль-Абси

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; mozh@gsu.by

Постановка задачи. На современном этапе развития техники все чаще в системе теплоснабжения стали появляться трехслойные полимерные и композитные трубы, которые необходимо рассчитывать на НДС с учетом силовых, температурных, реономных и других факторов [1—2].

В связи с этим, рассмотрим задачу о бесконечно длинном упругом цилиндре, заключенном в податливую оболочку и полиуретановой теплоизоляции, нагруженном внутренним давлением. Также рассмотрим алгоритм решения граничных задач, моделирующих определение напряжений в бесконечно длинном упругом цилиндре (математическая модель), заключенном в податливую оболочку, нагруженном внутренним давлением. Внутренний слой (т.е. сам цилиндр) состоит из функционально-градиентного материала [3].

Методы исследования. Примем, что поведение оболочки и наполнителя описывается уравнениями теории упругости и $\varepsilon_z^* = \varepsilon_z = 0$. Необходимо: решить систему уравнений при заданных геометрических и физических параметрах (с учётом функционально-градиентного материала цилиндра), найти напряжения и перемещения.

Результаты и обсуждение. Разработан алгоритм и создана программа, реализующая расчет напряжений и перемещений для трубы в податливой оболочке с полиуретановой теплоизоляцией.

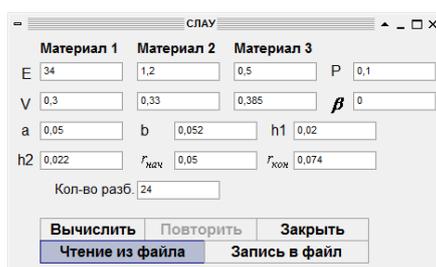


Рис. 1. Главное окно программы

После команды «Вычислить» программа по заранее определенному алгоритму строит матрицу и вектор свободных членов системы линейных алгебраических уравнений, решает ее, по выведенным формулам определяет напряжения и перемещения и представляет результаты в виде таблицы, по нажатию клавиши «график» будут построены графики зависимости напряжений и перемещений $u_r^{(k)}$ от r (см. рис. 2—4). Для граничных значений r (на границе двух слоев) выводятся искомые характеристики

ки для двух материалов.



Рис. 2. График зависимости $\sigma_r^{(k)}$ от r

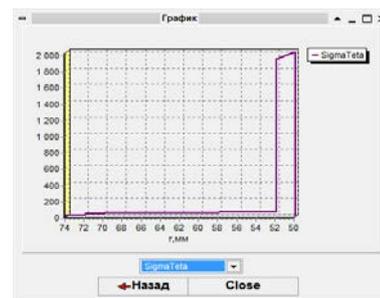


Рис. 3. График зависимости $\sigma_\theta^{(k)}$ от r

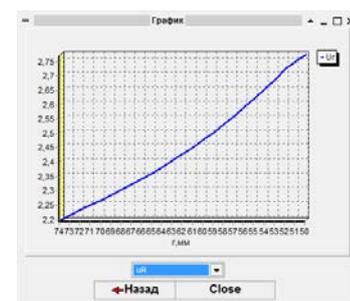


Рис. 4. График зависимости $u_r^{(k)}$ от r

1. Можаровский В.В., Кузьменков Д.С. Реализация розрахунку напружень багатослоєвих труб // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка Серія: фізико-математичні науки. — 2015, № 5, 173—178
2. Xia M., Takayanagi H., and Kemmochi K. Analysis of Transverse Loading for Laminated Cylindrical Pipes // Composite Structures. — 2001 (53), no. 3, 279—285
3. Tutuncu N. and Ozturk M. Exact Solution for Stresses in Functionally Graded Pressure Vessels // Composites: Part B (Engineering). — 2001 (32), 683—686

УЧЕТ ОПЫТА ЖИВОЙ ПРИРОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЗВЕТВЛЯЮЩИХСЯ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР

А.Н. Полилов, Н.А. Татусь

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; nikalet@mail.ru

В докладе рассматривается аналогия по изгибной податливости профилированных балок класса констрэра (с постоянной площадью поперечного сечения) и разветвляющихся композитных структур, напоминающих крону дерева с постоянной суммой площадей сечений ветвей (правило Леонардо). Показано, что использование стеклопластика в подобных упругих элементах позволяет снизить их массу примерно в 20 раз по сравнению со стальным аналогом. Отмечены ограничения возможности использования линейаризованного уравнения изгиба для профилированных балок.

Рост изгибной податливости за счет ветвления. Один из интересных методов повышения изгибной податливости композитного упругого элемента можно «подсмотреть», изучая структуру кроны яблони. Ещё Леонардо да Винчи в своих записках высказывал следующее утверждение: «Сумма квадратов диаметров ветвей одинакова до и после ветвления», и поэтому суммарная площадь сечения ветвей дерева должна быть постоянной и равной площади ствола».

В качестве наглядной простейшей модели ветвления представим себе, что консольная цилиндрическая балка диаметром d , нагруженная на конце сосредоточенной силой P (рис. 1), разветвилась на N одинаковых стержней с сохранением суммарной площади сечения:

$$d^2 = \sum_{i=1}^N d_i^2 \Rightarrow d_{N1} = \frac{d}{\sqrt{N}}. \quad (1)$$

Здесь d_{N1} — диаметр каждой из одинаковых ветвей; второй нижний индекс означает номер узла ветвления — в данном случае — первый и единственный. Расстояние от заделки, на котором целесообразно производить разветвление, выбирается из условия сохранения прочности, т.е. равных максимальных изгибных напряжений в корневом сечении (у заделки) и в N ветвях в узле разветвления:

$$\frac{PL}{\pi d^3} = \frac{PL_{N1}}{\pi d_{N1}^3} \Rightarrow L_{N1} = \frac{L}{\sqrt{N}}. \quad (2)$$

Отношение δ_v прогиба v_{N1} ветвящейся структуры (при условии постоянства напряжений до и после ветвления) к прогибу v «целиковой» равно:

$$\delta_v = \frac{v_{N1}}{v} = \frac{1 + (N-1)}{\sqrt{N^3}} \xrightarrow{N \rightarrow 1} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} 1. \quad (3)$$

Оказывается, что для обеспечения максимального прогиба при сохранении равнонапряженности в месте ветвления дереву выгодно ветвление ровно на три ветки:

$$N_{opt} = 3 \Rightarrow \delta_v = \frac{v_{31}}{v} \approx 1,38.$$

Это — наибольшее возможное значение коэффициента прогиба для одного ветвления с сохранением равнопрочности.

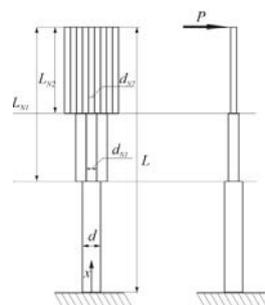


Рис. 1. Схема нагружения консольной разветвленной балки.

Если принять наилучшим ветвление на 3 одинаковые ветки и продолжить процесс, рассмотрев два узла ветвления на 3, а затем — на 9 ветвей с сохранением условия равнонапряженности (2), то получим гораздо большую податливость.

При неограниченном росте числа «равнопрочных» ветвлений на три ветви коэффициент прогиба δ_v растёт, но ограниченно, стремясь к предельному значению 1,91. Это максимальный коэффициент роста податливости при сохранении прочности, который можно получить при ветвлении на целое число (три) одинаковых веток.

Чтобы оценить предельное значение коэффициента прогиба для непрерывного (фрактального) ветвления, нужно представить постоянно меняющимся нецелое число N ветвей с сохранением суммарной площади (1) и равнонапряженности (2). В идеальном случае ветвящийся цилиндрический стержень имеет при сохранении прочности втрое большую податливость, чем однородный.

Ветвящиеся равнонапряженные композитные структуры столь же эффективны в качестве упругих элементов, как и профилированные балки типа констрэра (с постоянной площадью поперечного сечения). Преимущество ветвления по сравнению с профилированием балки состоит в сохранении непрерывного прямолинейного армирования, что повышает реализацию изгибной прочности. Ветвящиеся элементы, как гасители ударов, можно рекомендовать для приемных модулей на космических платформах.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-08-01472.

1. Полилов А.Н., Плитов И.С., Татусь Н.А. Компьютерное моделирование рациональной структуры криволинейного армирования профилированных композитных элементов // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2013, № 4, 73—79
2. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Плитов И.С. Оценка влияния разориентации волокон на жесткость и прочность профилированных композитных элементов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2013, № 5, 58—67
3. Полилов А.Н. Этюды по механике композитов. — М.: Наука, ФИЗМАТЛИТ. — 2015.

ВЛИЯНИЕ ГИДРАТАЦИОННОЙ ВОДЫ В СИЛИКАТАХ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПТФЭ

С.А. Слепцова¹, М.М. Макаров, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева, В.И. Федосеева

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия; ssard@yandex.ru

Природные слоистые силикаты являются перспективным материалом для разработки полимерных композитов. Общим свойством слоистых силикатов является замещение некоторых атомов кислорода гидроксильными группами, что обуславливает появление в их кристаллической структуре нескольких форм воды. Согласно классификации в [1], вода в силикатах делится на: гигроскопическую (на поверхности частиц минерала); межпакетную или плоскостную, связанную с обменными катионами; гидроксильную, или конституционную. Первые две представляют собой в сумме сорбированную воду, или воду набухания, а последняя — воду, координационно связанную с другими элементами кристаллической решетки.

Цель работы — исследование влияния воды в силикатах на свойства ПКМ на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ).

Материалы и методы. В качестве наполнителя использован каолинит Глуховецкого месторождения. Монокристалл каолина представляет собой двухслойный алюмосиликат, содержащий гидратационную воду и состоящий из химически связанных слоев диоксида кремния и гидратированного оксида алюминия. Для оценки влияния содержания воды в каолините на свойства ПТФЭ были взяты две температурные точки: 1) $T_1 = 120$ °С, соответствующая полному удалению адсорбированной воды из структуры каолинита и 2) $T_2 = 850$ °С, соответствующая выделению межплоскостной и конституционной воды с образованием метакаолинита — промежуточного продукта обжига каолинита.

Результаты и обсуждение. В табл. приведены триботехнические свойства композитов в зависимости от условий температурной обработки минерального наполнителя.

Таблица. Триботехнические характеристики ПКМ

Композит	T обработки, °С	I , мг/час	f
ПТФЭ	—	82	0,21
+ 5 мас.% К	120	0,57	0,28
	850	0,39	0,23

Из табл. видно, что введение в ПТФЭ прокаленного каолинита приводит к повышению износостойкости в 1,5 раза и снижению коэффициента трения по сравнению с результатом, который дал ПКМ с каолинитом без термической обработки.

ИК-спектры композитов отличаются тем, что после глубокой термической обработки каолинита исчезает неярко выраженный пик в области $1090\text{—}1100\text{ см}^{-1}$, который отвечает деформацион-

ным колебаниям группировок Al–O–Si в структуре слоистых силикатов. Это подтверждает предположения о перестройке кристаллической решетки каолинита при сильном нагревании с сохранением кремнекислородного остова и разрушением наиболее уязвимых октаэдрических слоев, выстроенных катионами алюминия [2]. Характерные полосы поглощения в спектрах композитов после трения свидетельствуют о протекании термо- и трибоокислительных процессов. Видно, что повышению износостойкости ПКМ, содержащем каолинит после глубокой термической обработки, соответствуют спектры, свидетельствующие о более интенсивных трибоокислительных процессах на поверхности трения.

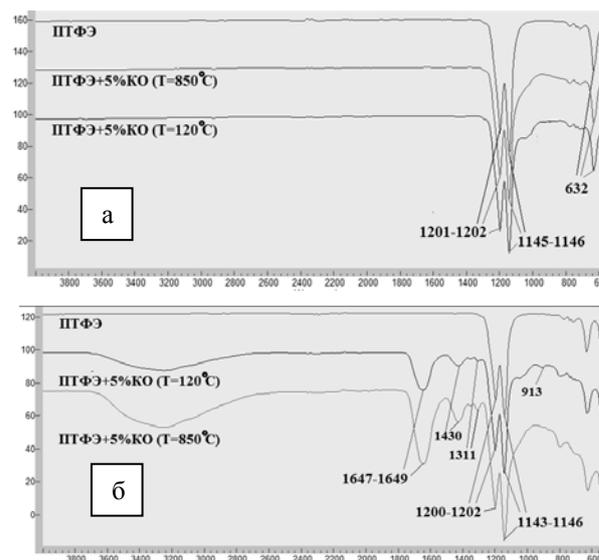


Рис. ИК-спектры ПКМ до (а) и после (б) трения

Таким образом, результаты исследований доказывают о положительном влиянии процессов глубокого прокалывания каолинита на свойства ПКМ и об отсутствии взаимосвязи между процессами трибоокисления и наличием воды в минеральном наполнителе.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ в рамках Госзадания по проекту № 11.1557.2017

1. Овчаренко Ф.Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. — Киев: АН УССР. — 1961
2. Юсупов Т.С. Новые технологические решения переработки и использования минерального сырья на основе изменения структуры и свойств минералов. // Техника и технология силикатов. — 2013 (20), № 2, 17—21

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

В.М. Таран, А.В. Лясникова, И.П. Гришина, О.А. Дударева, О.А. Маркелова

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия;
markelovaoa@bk.ru

Пористые композиционные наноструктурированные покрытия широко применяются в различных областях техники и медицины [1]. Отличительной особенностью данных покрытий является возможность прогнозирования размеров особых структурных образований покрытия — пор [2].

Известно, что пористость покрытия определяется как отношение объема порового пространства к общему объему покрытия и является безразмерной величиной. В связи с тем, что размеры и форма пор в покрытии имеют большое разнообразие, возникает необходимость замены множества форм пор на простейшую геометрическую модель пористого тела — каркас, состоящий из плотно уложенных сферических частиц одинакового размера с пустотами между этими частицами. В такой модели пористость зависит от того, насколько плотно расположены сферические частицы друг относительно друга и не зависит от размера сферических частиц. Теснота укладки сфер может быть описана углом между центром соседних сфер. При этом пористость принимает минимальное значение при гексагональной укладке сфер и максимальное при кубической укладке.

В реальности частицы не являются идеальными сферами, а имеют разнообразие форм и размеров. При этом описание пористой структуры не сводится к моделированию каноническими геометрическими фигурами, а может быть получено в результате применения вероятно-статистического подхода.

Представим поры покрытия в виде капиллярной и сферической моделей — трубка правильной геометрической формы или сфера, в которой размеры пор — радиус и длина трубки или радиус сферы, моделирующих поры.

Известно, что поры в покрытии можно рассматривать как изолированные друг от друга или взаимосвязанные. Для покрытий, используемых в технике и медицине, большой практический интерес представляют взаимосвязанные поры.

При этом для количественной характеристики взаимосвязанных пор используют понятие «извилистость». Будем учитывать, что этот параметр наиболее эффективен, когда извилистость не образует внутри объема покрытия замкнутых контуров, а имеет выход на поверхность.

Для построения математической модели для оценки свойств пор, образующих извилистость представим каждую взаимосвязанную пору в виде ее характеристической длины, которая в системе координат может рассматриваться как отрезок ломаной линии.

Для последующего компьютерного моделирования извилистости и пористости наиболее эффективно в качестве системы координат для моделирования выбрать модель сетки или решетчатую модель.

Далее находим длины проекции поры в выбранной системе координат, для чего проецируем соседние длины пор на произвольное направление n -й поры. При этом длина проекций $(n+1)$ и $(n-1)$ пор будет равна $2l \cos \alpha$. Затем находится средняя проекция на то же направление пор $(n+2)$ и $(n-2)$: $2l \cos^2 \alpha$. По аналогии средние проекции пор с номерами $(n+k)$ и $(n-k)$ будут равны: $2l \cos^k \alpha$. Таким образом, сумма длин проекций всех $(2n+1)$ пор на произвольное направление будет равна:

$$\bar{l} = l(1 + 2 \cos \alpha + 2 \cos^2 \alpha + \dots + 2 \cos^n \alpha).$$

Аналогичную зависимость составляют для случая, если ветвление состоит из четного числа пор $(2n+2)$.

После получения необходимых уравнений среднюю характерную длину поры (\bar{l}) связывают с наиболее вероятной длиной поры.

Затем, на основе экспертных оценок и полученных выражений проводится имитационное моделирование методом Монте-Карло для определения усредненных характеристик пористых покрытий.

В последнюю очередь данные полученные в результате статистических испытаний сравниваются с результатами, полученными в процессе экспериментальных испытаний реальных изделий с покрытиями на лабораторных стендах.

При моделировании по представленной методике сравнение результатов показало незначительное различие данных экспериментов и статистических расчетов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01250 а и № 15-03-02767 а, стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-289.2015.4, а также гранта Президента для государственной поддержки молодых российских ученых РФ — докторов наук МД-1403.2017.8.

1. Лясников В.Н., Лясникова А.В., Дударева О.А. Плазменное напыление: монография. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. — 643 с.
2. Таран В.М., Лясникова А.В., Протасова Н.В., Дударева О.А. Физико-математическое моделирование процесса формирования нанопористой структуры плазмонапыленных покрытий // Нанотехника. — 2012, № 1, 55—58

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНЫМИ СМОЛАМИ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.А. Сементовская

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
sementik_anya@mail.ru

Введение. В соответствии с сегрегационной теорией снижение износостойкости может быть следствием разупрочняющего действия атомов некоторых химических элементов, концентрирующихся в тонком слое поверхности трения. В качестве основного компонента полимерной матрицы во фрикционных композиционных материалах зачастую используется синтетический каучук, вулканизация которого осуществляется серой. Молотая сера, которая вводится в композит на стадии смешения компонентов, в процессе трения переходит в пленки переноса и диффундирует с контактной поверхности на границы зерен металла [1, 2]. В результате при нестационарном высокотемпературном трении снижается износостойкость металлических деталей трибосопряжений. Один из путей решения проблемы повышения износостойкости — исключение компонентов композиционного материала, содержащих химические элементы, разупрочняющие структуру металлического контртела [3].

Цель работы — экспериментальное подтверждение возможности вулканизации синтетического каучука фенолоформальдегидными смолами (ФФС) для исключения из состава композитов серы, а также исследование механизма данного процесса.

Материалы и методы. Использовали маслостойкий каучук марки БНКС-28АМН 2 группы с содержанием акрилонитрильных групп 29% (ТУ 38.30313-2006), фенолоформальдегидную смолу нолачного типа (Н, ТУ 6-07-487-95), фенолоформальдегидную смолу резольного типа (Р, ТУ 6-05751768-35-94). Выбор указанных термореактивных связующих обусловлен наиболее частым их использованием в качестве полимерной матрицы в коммерческих термостойких фрикционных материалах. Кроме того, выбор смол связан с возможностью получения сшитого продукта различной структуры.

В качестве катализатора реакции вулканизации использовали хлорид олова SnCl_2 , в качестве ускорителей вулканизации — оксид магния MgO и стеариновую кислоту $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{O}_2$.

Исследовали модельные композитные смеси, составы которых приведены в табл. 1. Для приготовления композитных смесей был выбран метод

смешивания компонентов в растворителе, в качестве которого был выбран метилэтилкетон. Растворитель представляет собой полярное соединение, взаимодействие которого с каучуком обусловлено наличием в последнем полярных акрилонитрильных групп. Для повышения степени однородности модельные смеси обрабатывали ультразвуком в течение 30 мин при $50\text{ }^\circ\text{C}$, после чего растворитель удаляли выпариванием при температуре $40\text{—}140\text{ }^\circ\text{C}$. Для изучения структуры полученных композитных смесей использовали метод ИК-спектроскопии (ИК-Фурье спектрометр Nicolet 5700).

Таблица 1. Состав исследуемых фенолокаучуковых смесей

Композитная смесь	1	2	3
Содержание фенолоформальдегидной смолы, мас. %	Н, 50	Р, 50	Н, 25 + Р, 25

Результаты и обсуждение. Для установления химического взаимодействия между каучуком и смолами анализировали ИК-спектры исходных материалов и модельных композитных смесей.

Было рассмотрено три механизма вулканизации: механизм Гултча, механизм Ван-дер-Меера и ионоцепной механизм Гиллера. В результате исследования условий и механизмов протекания взаимодействия бутадиен-нитрильного каучука с фенолоформальдегидными смолами установлено, что наиболее вероятным механизмом фенольной вулканизации является механизм Ван-дер-Меера. Согласно данному механизму реакция вулканизации проходит с отщеплением атома водорода от метиленовой группы каучука.

1. Колесников В.И., Казаков А.Т., Сергиенко В.П., Сычев А.П. Влияние модифицирующих добавок к фрикционным материалам на структурные изменения в поверхностных слоях металлического контртела // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2009, № 8, 23—34
2. Бриггс Д., Сих М.П. (ред.) Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. — М.: Мир. — 1987
3. Колесников В.И., Сергиенко В.П., Сычев А.П., Купреев А.В. Тепловые эффекты и структурные изменения материалов в маслоохлаждаемых фрикционных парах трения // Вестник машиностроения. — 2007, № 9, 19—23

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 7

Медико-биологические аспекты применения полимерных и композиционных материалов

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2017)**

27—30 июня 2017 г., Гомель, Беларусь

АНТИБАКТЕРИАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ПЕКТИНОВ И НАНОКОМПОЗИТОВ ПЕКТИН-АГ

К.С. Гилевская¹, Е.И. Ладутько², Г.И. Новик²

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; k_hilevskay@mail.ru

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. В настоящее время антибиотикотерапия является главным инструментом в борьбе с бактериальными инфекциями. Известно, что в отличие от органических антибиотиков к неорганическим наночастицам резистентность микроорганизмов не развивается. Природные полисахариды, например, пектины, альгинаты, хитозаны, обладают антимикробной активностью [1]. В связи с этим представляет интерес получение композиционных полимер-неорганических носителей, включающих пектины и неорганические наночастицы с антибактериальными свойствами.

Цель работы — изучить антибактериальную активность пектинов и синтезированных на их основе гидрозолей наноконкомпозитов пектин-Аг.

Материалы и методы

Использовали пектин высокометоксилированный (ПектВМ, СЭ ~ 71%), низкометоксилированный (ПектНМ, СЭ ~ 35—42%) и амидированный низкометоксилированный (ПектА, СЭ ~ 32%, СА ~ 18%). Массовое соотношение пектин:AgNO₃ в реакционной смеси составляло 10:1 и 25:1, концентрация AgNO₃ в реакционной смеси 2,0 мМ.

Антибактериальную активность пектинов и синтезированных на их основе наноконкомпозитов пектин-Аг исследовали диффузионным методом «лунок» на культуре грамположительных спорообразующих бактерий рода *Bacillus*: штаммы *B. pumilus* (БИМ В-211 и БИМ В-373) и *B. subtilis* (БИМ В-25 и БИМ В-210).

Результаты и обсуждение

Отрицательно заряженные (ζ -потенциал ~ -60 мВ) гидрозоли пектин-Аг синтезировали методом «зеленой» химии: нитрат серебра (AgNO₃) восстанавливали пектинами в щелочной среде (рН ~ 11) при комнатной температуре [2]. В спектрах поглощения полученных гидрозолей регистрируется полоса поверхностного плазмонного резонанса, характерного для наноразмерного Ag⁰, с максимумами при 400–425 нм, интенсивность которых зависит от массового соотношения пектин:Аг и типа используемого пектина (рис. 1).

Антибактериальную активность в отношении грамположительных спорообразующих бактерий рода *Bacillus* проявляют только амидированные пектины: для штамма *B. pumilus* БИМ В-373 отмечена зона задержки роста бактерии в 8 мм, а для штаммов бактерий *B. pumilus* БИМ В-211, *B. subtilis* БИМ В-210 установлено полное подавление роста.

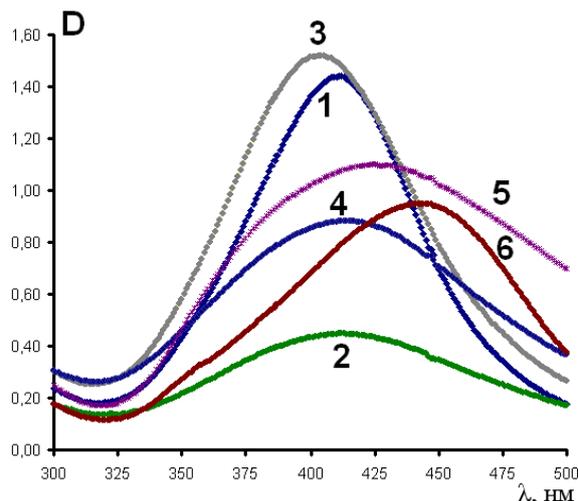


Рис. 1. Спектры поглощения гидрозолей ПектВМ-Аг (1, 2), ПектНМ-Аг (3, 4), ПектА-Аг (5, 6), разбавленных в 20 раз. Массовое соотношение пектин:AgNO₃ = 10:1 (1, 3, 5) и 25:1 (2, 4, 6).

Антибактериальные свойства синтезированных гидрозолей пектин-Аг зависят от массового соотношения пектин:Аг. Так, гидрозоли, синтезированные при массовом соотношении пектин-Аг = 10:1, не проявляют антибактериальную активность в отношении выбранных штаммов бактерий. В то же время независимо от типа используемого пектина для всех гидрозолей, синтезированных при соотношении пектин-Аг = 25:1, зарегистрированы статистически достоверные зоны задержки роста бактерий. Причем антибактериальная активность этих гидрозолей по отношению к исследуемым штаммам *Bacillus* сопоставима с активностью антибиотика канамицина.

Таким образом, наибольшую активность по отношению к *B. pumilus* и *B. subtilis* проявляют амидированный пектин и наноконкомпозиты пектин-Аг (массовое соотношение пектин-Аг = 25:1), которые могут быть использованы при разработке лекарственных форм с антибактериальными свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Х16-057).

1. Вальшев А.В. // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН (электронный журнал). — 2013 (3), 1—7
2. Al-Muhanna K.A., Гилевская К.С., Куликовская В.И., Красковский А.Н., Агабеков В.Е. // Коллоидный журнал. — 2015 (6), 683—690

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК ПО ДАННЫМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

М.Н. Стародубцева¹, И.Е. Стародубцев², Н.И. Егоренков¹

¹Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; yegorenkov-n@mail.ru

²Белорусский государственный университет, Гомель, Беларусь

Введение. Поверхностный слой биологических клеток можно рассматривать как слоистый композитный материал. Основной вклад в его механические свойства при их изучении методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) вносит прилежащий к внутренней стороне плазматической мембраны кортикальный цитоскелет, пространственная структура которого зависит от типа и состояния клетки. Структура кортикального цитоскелета через интегральные и поверхностные белки, включая их кластеры, связанная со структурой мембраны и гликокаликса, влияет на свойства всего поверхностного слоя. Определение параметров пространственного распределения механических свойств клеточной поверхности АСМ-методами позволяет анализировать на наноуровне способность клеток взаимодействовать с субстратами и другими клетками. В отличие от геометрических характеристик (параметров) поверхностей, для которых уже существуют международные стандарты их базового набора, для характеристик пространственного распределения механических свойств они пока не разработаны. Из существующего набора геометрических характеристик, которые потенциально могли бы быть использованы для оценки карт механических свойств клеточной поверхности, некоторые не учитывают латеральный порядок этих карт, обусловленный структурой кортикального цитоскелета, другие не могут быть использованы из-за различия единиц измерения (размерностей), используемых для построения трёхмерных карт этих свойств (в осях X, Y и Z).

Цель работы — разработка методов оценки пространственного распределения механических (фрикционных) свойств поверхностного слоя биологических клеток на основе карт распределения латеральных (фрикционных) сил, полученных с помощью АСМ в контактном режиме сканирования.

Материалы и методы. Сканирование поверхности клеток проводили на АСМ «НТ-206» («МикроТестМашины», Беларусь) в контактном режиме сканирования с использованием CSC38 игл-зондов («MikroMash») на воздухе. Оценивали параметры сил трения (среднего значения, $F_{тр}$, и шероховатости, $R_{q-тр}$). В работе использованы образцы эритроцитов, фибробластов и эпителиальных клеток человека. АСМ-изображения обрабатывали с помощью программы «SurfaceXplorer 1.3.11» («МикроТест-

Машины», Беларусь). Оценку фрактальной размерности АСМ-изображений (D_F), её зависимости ($D_F=f(t)$) от коэффициента масштабирования (t) и анализ периодограмм проводили с помощью разработанного программного комплекса.

Результаты и обсуждение. Для микромасштабных участков поверхности эритроцитов, фибробластов и эпителиальных клеток раковых линий проанализированы зависимости ($D_F = f(t)$) рассчитанной методом подсчета кубов фрактальной размерности карт латеральных сил от коэффициента масштабирования t по оси Z. Параметры этих зависимостей могут характеризовать структуру АСМ-изображений, так как связаны с размерами и частотами пространственного расположения структурных особенностей поверхности [1]. Выявлены различия $D_F = f(t)$ в зависимости от типа клеток, температуры их испытаний и параметров АСМ-изображения (количества пикселей, размера).

Для АСМ-изображений микромасштабных участков поверхности клеток (карт латеральных сил) проведен спектральный анализ. При этом карты сил представляли как совокупность N линий сканирования (рядов). Для каждой линии применено преобразование Фурье и рассчитана периодограмма. Из полученных N периодограмм сформирована новая карта, которая была разбита на 8 частотных диапазонов, для каждого из которых была рассчитана фрактальная размерность. Предложенный способ позволяет охарактеризовать сложность спектрального состава пространственных особенностей карт механических свойств поверхности биологических клеток в зависимости от диапазона частот ($D_F = f(\omega)$).

Заключение. Две новые АСМ-характеристики пространственного распределения механических свойств поверхности (зависимости $D_F = f(t)$ и ($D_F = f(\omega)$)) являются потенциально полезными для анализа типа и состояния биологических клеток.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта Б14-042) и гранта Президента на 2017 г.

1. Starodubtseva M.N., Starodubtsev I.E., and Starodubtsev E.G. Novel Fractal Characteristic of Atomic Force Microscopy Images // Micron. — 2017 (96), 96—102

ЧАСТИЦЫ ПЕКТИНАТА КАЛЬЦИЯ, СОДЕРЖАЩИЕ КОРИЧНУЮ КИСЛОТУ

А.Н. Красковский, В.И. Куликовская

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; aleks.kraskovsky@gmail.com

Введение. Клеточные культуры лекарственных растений, культивируемые *in vitro*, широко используются в различных областях биологии и медицины как продуценты ценных вторичных метаболитов, обладающих широким спектром биологического действия. Для повышения биопродуктивности клеточных культур применяют регуляторы роста [1]. Ранее нами [2] было показано, что гелевые частицы пектината кальция стимулируют рост суспензии клеток растений рода *Vinca*. Использование полисахаридных частиц в качестве контейнеров регуляторов роста не исключено, что повысит наработку фитомассы и биосинтез фармакологически активных метаболитов в клетках растений.

Цель работы — получение гелевых частиц пектината кальция, содержащих *транс*-коричную кислоту (ТКК), которая является регулятором ростовой и биосинтетической активности культуры клеток.

Материалы и методы. Частицы пектината кальция синтезировали методом ионотропного гелеобразования путем сшивки макромолекул пектина (степень этерификации 35—42%, $M_n \sim 89000$, Herbstreith&Fox) катионами кальция [3]. В полученные частицы включали *транс*-коричную кислоту из ее спиртовых (96%) растворов с различной концентрацией (табл. 1). Эффективность включения (ЭВ, %) ТКК рассчитывали по формуле:

$$\text{ЭВ} = (m_0 - m_1) / m_0 \cdot 100, \quad (1)$$

где m_0 и m_1 — количество кислоты в исходном растворе и в супернатанте после включения, соответственно, мг. Величину ζ -потенциала частиц пектината кальция определяли с помощью анализатора Zetasizer Nano-ZS (Malvern, Великобритания). Лиофилизированные порошки частиц получали на лиофильной сушилке Freezone 1.0 ("Labconco", США).

Результаты и обсуждение. В зависимости от количества *транс*-коричной кислоты в растворе эффективность ее включения в частицы составляет 15—28% (табл. 1). При увеличении концентрации ТКК в растворе с 1,0 до 15,0 мг/мл ее содержание в частицах увеличивается в ~ 10 раз и достигает 57 мас.% в пересчете на сухой вес частиц. Частицы пектината кальция, содержащие ТКК, имеют сферическую форму (рис. 1) и отрицательный заряд, так как они адсорбируются на положительно заряженную поверхность. Включение ТКК в частицы пектината кальция практически не изменяет абсолютное значение ζ -потенциала. Так, дзета-потенциал для

исходных частиц составляет $-(11,8 \pm 1,6)$ мВ, а для частиц, содержащих 42 мас.% *транс*-коричной кислоты — $-(9,6 \pm 2,1)$ мВ.

Таблица 1. Содержание *транс*-коричной кислоты в частицах пектината кальция

Концентрация раствора <i>транс</i> -коричной кислоты, мг/мл	Эффективность включения <i>транс</i> -коричной кислоты, %	Содержание <i>транс</i> -коричной кислоты в частицах, мас.%
0,1	$14,7 \pm 0,9$	$1,4 \pm 0,1$
1,0	$22,5 \pm 13,2$	$5,9 \pm 1,3$
5,0	$21,1 \pm 3,5$	$22,0 \pm 2,8$
7,5	$24,9 \pm 0,5$	$33,0 \pm 1,4$
10,0	$25,0 \pm 6,9$	$42,0 \pm 1,4$
15,0	$27,5 \pm 1,8$	$57,0 \pm 5,7$
25,0	$16,1 \pm 2,4$	$41,5 \pm 0,7$

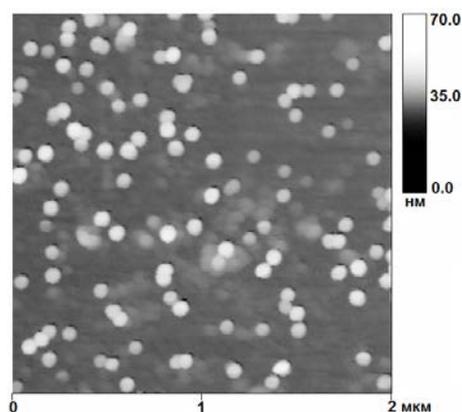


Рис. 1. АСМ-изображение частиц пектината кальция, содержащих ТКК, на подложке полиэтиленimina

Таким образом, получены частицы пектината кальция, содержащие до 57 мас.% *транс*-коричной кислоты, в виде коллоидов и лиофилизированных порошков.

- Юрин В.М., Дитченко Т.И., Молчан О.В., Шапчиц М.П., Ромашко С.Н., Булатова А.А., Логвина А.О. Культура растительных клеток и тканей: технология получения, разнообразие фармакологически активных метаболитов и приемы регуляции их синтеза // Труды БГУ. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. — 2009 (4), Ч. 2, 168—182
- Молчан О.В., Драгун П.А., Красковский А.Н., Куликовская В.И., Юрин В.М., Агабеков В.Е. // Материалы V Международной научной конф. «Наноструктурные материалы-2016: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2016), 22—25 ноября 2016, Минск, 421—423
- Красковский А.Н., Гилевская К.С., Куликовская В.И., Агабеков В.Е. Получение и свойства наночастиц пектината кальция // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. — 2014, № 1, 51—56

ПРИМЕНЕНИЕ БИМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕМОДИНАМИКИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТРЕНИРОВОЧНОГО ПРОЦЕССА

Ю.Г. Кузьминский¹, М.В. Борисенко²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, guk49mpri@mail.ru
²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Введение. Тонометрия на этапах покоя — нагрузка — восстановление нагрузочного тестирования является наиболее доступным инструментальным средством контроля тренировочного процесса с ограниченными информационными возможностями, включающими только частоту пульса и давления, расширяемыми применением компьютерных технологий. Тренировки спортсменов массовых квалификаций с большим количеством участников предъявляют к компьютерным технологиям требования быстроты, экономичности, информативности, простоты.

Методология. Методом расчета значений параметров гемодинамики является одномерное моделирование ламинарных течений крови в артериальной части сердечно-сосудистой системы. Исходными данными модели являются значения параметров антропометрии, тонометрии и уровня физической нагрузки. Выходными данными модели являются значения параметров сердца, сосудов и биохимии крови. Дополнительным условием является соответствие потребного и поставляемого количества кислорода. Разработаны 3 методики и соответствующее программно-аппаратное обеспечение [1]: «БИОДИС» на основе данных классической тонометрии; «БИОСПАС» обработки данных опроса с частотой 120 Гц датчика давления классического тонометра; «Д-СПАС» окклюзионной тонометрии в течении всех фаз нагрузочного тестирования путем опроса датчика давления с частотой 120 Гц [2].

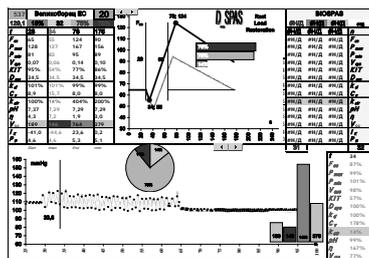


Рис. 1. Протокол результатов обследования «Д-СПАС»

«Д-СПАС» осуществляет осциллометрическую обработку данных опроса в течении процесса стандартного нагрузочного тестирования датчика давления полуавтоматического тонометра «LD1» с запорной мембраной. Результат включает (рис. 1) параметры сердца (12), сосудов (2), реологии крови (8), функционального состояния (10), вариабельность сердечного ритма (12). Представлены: профили отклонения от норм значения функциональных и гемодинамических параметров, схемы диагностики гипертонии и сердечной недостаточности, мгновенный профиль пульсовой волны, схема объема потребления кислорода в контрольных точках, схема оценки емкостей источников энергообеспечения и параметров точки минимума ЧСС, схема распределе-

ния долей источников энергообеспечения мгновенная, схема амплитуд изменений ключевых параметров мгновенная, схема динамики изменений ключевых параметров. Ключевым диагностическим инструментом является схема сопоставления индивидуальной и статистической динамик изменения ЧСС.

Методики апробировались на различных группах спортсменов (сборная республики по самбо; сборная области по пожарно-техническим видам спорта; команды футболистов и хоккеистов; студенты медицинского университета, факультета физического воспитания университета различной спортивной ориентации, военной кафедры университета транспорта).

Результаты и обсуждение. Информативность метода «Д-СПАС» иллюстрируется на рис. 2 сравнением результатов показателей одного из студентов и специалиста факультета физического воспитания с высоким спортивным разрядом. Существенное отличие проявляется в профиле пульсовой волны в период нагрузки (гемодинамический профиль студента имеет все признаки наличия аритмии двойного пульса, которые в периоде покоя отсутствовали).

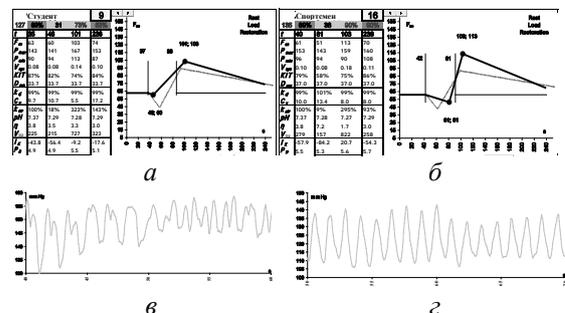


Рис. 2. Результаты тестирования двух обследуемых: а, б — параметры гемодинамики; в, г — осцилляции АД при проведении теста

Предложенные методики мониторинга параметров состояния сердечнососудистой системы обладают рядом достоинств — простота, экономичность, информативность, скорость. Разработки будут полезны как при массовых обследованиях населения, регулярном контроле функционального состояния работников опасных профессий, так и при проведении тренировок и занятий физической культурой.

1. Шилько С.В., Кузьминский Ю.Г., Борисенко М.В. Биомеханическая диагностика гемодинамики сердечно-сосудистой системы // В кн. Инновационные аспекты современной медицины. Часть 2. Новосибирск, СибАК. — 2014, 11—41
2. Борисенко, М.В. Биомеханическая модель окклюзии артерии в процессе осциллометрии / М.В. Борисенко, Ю.Г. Кузьминский // Тезисы междунар. науч.-практ. конф. «Поликомтриб-2015». — Гомель. — 2015, 254

ДЕФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВИБРОТОДА — ИСТОЧНИК ПОЛИЧАСТОТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПАЦИЕНТА

Д.И. Сагайдак¹, Ю.Г. Кузьминский²

¹Научно-методическое учреждение Белорусского государственного университета «Республиканский центр проблем человека», Минск, Беларусь; petbsu@tut.by

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Физиологическое воздействие механических колебаний на соматические структуры и обменные процессы в биосистемах, в частности, микроциркуляцию крови, основано на возникновении многочастотного параллельного резонанса в клетках, миофибриллах, тканях, органах и организма в целом. Реализующие это воздействие вибростимуляторы в виде напольных платформ и стимуляторов с выступающим вибротодом более 70 лет используются в реабилитационных и развивающих процедурах.

Существование значительных различий пациентов по антропометрическим и морфологическим признакам, сопровождаемых флуктуациями резонансных механических частот вышеназванных биоструктур, приводит к необходимости генерации и передачи поличастотных колебаний для достижения наиболее полного реабилитационного и развивающего воздействия.

Цель — обеспечение высокоэффективного поличастотного биомеханического стимулирования физиологических процессов при моночастотном формировании колебаний напольными виброприводами.

Материалы и методы. Применялись вибростимуляторы в виде напольных платформ, акселерометрические и гироскопические сенсоры на основе высокоточных контактных средств измерения параметров колебаний поверхности.

Результаты и обсуждение. Классический напольный вибростимулятор ИППО-1, представленный на рис. 1, создает вертикальные воздействия с постоянной частотой. Диапазон частот, которые могут задаваться виброприводом в каждом сеансе составляет 5—40 Гц.

Для повышения скорости биохимических, гемодинамических и лимфодренажных процессов авторами разработан вибротод (А на рис. 1), который при взаимодействии с телом пациента за счет деформационно-амортизационных характеристик корпуса генерирует суммарные частоты и обертоны на контактной поверхности вибротода в диапазоне от 3 до 145 Гц.

Методы сопровождения вибростимулирования впервые включали синхронное измерение частотно-амплитудных параметров колебаний на поверхности вибротода и тела пациента.

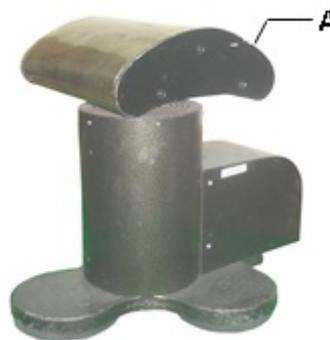


Рис. 1. Классический напольный вибростимулятор ИППО-1, реализующий вертикальное воздействие в диапазоне частот от 5 до 40 Гц. А — контактная поверхность вибротода.

В частности, спектр частот возникающих при задающей частоте вибротода 5 Гц, показан на рис. 2. Естественно, частотно-амплитудная генерация меняется в зависимости от частоты и амплитуды, задаваемых приводом.

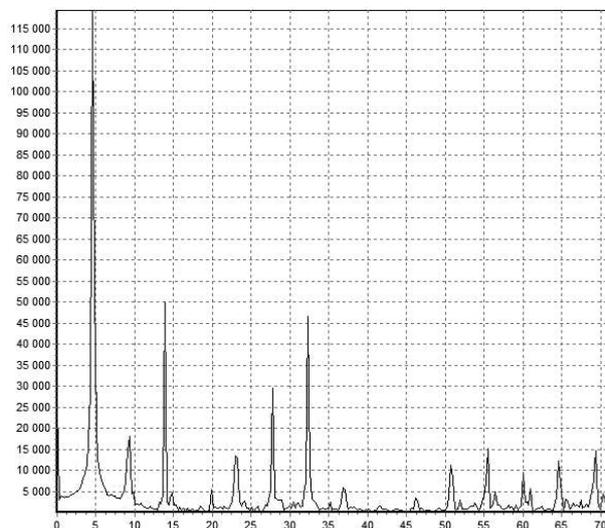


Рис. 2. Спектр колебаний поверхности полуцилиндрического вибротода тренажера ИППО-1 при основной частоте штока 5 Гц.

Заключение. Для повышения эффективности реабилитационных технологий целесообразно использовать поличастотную деформационную генерацию вибротодов, обеспечивающих оптимальную передачу механической энергии в зоны тела и достижение требуемых физиологических результатов.

ИМПЛАНТЫ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ ИЗ ПОЛИАРИЛЭФИРЭФИРКЕТОНА И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

С.В. Орлов¹, А.В. Чесноков², В.А. Старцев², И.А. Тимофеев²

¹Институт медицинской информатики, инновационный парк Сколково, Москва, Россия;

²Технологический университет, Королев, Россия; es_ut@bk.ru

Введение. В настоящее время практически отсутствует отечественное производство имплантов для стоматологии и ортопедии из полиарилэфирэфиркетона (ПЭЭК), в то время, как преимущество имплантов из ПЭЭК по сравнению с титановыми очевидно и отражены во многих научных публикациях [1]. Материал ПЭЭК имеет определенные биологические преимущества по сравнению с металлами для производства имплантов:

- по физическим параметрам находится ближе всего к кости человека;
- не травмирует твёрдые ткани (остеоциты) на протяжении всего срока службы;
- хорошо поддаются обработке;
- обладает уникальной биологической совместимостью, не вызывает аллергию.

В настоящее время накоплен критический материал исследователей противников титановых имплантов в ортопедии и стоматологии [2]. Существуют доказательства аллергии на титан. Многие исследования подтверждают, что титан окисляется пропитывает прилегающие ткани. Титановый имплант на границе «кость-металл» испытывает большие механические напряжения, что приводит к повреждению остеоцитов, возникновению воспалительных реакций и отторжению импланта.

Цель работы. Обоснование эффективности применения имплантов для ортопедии и стоматологии из материалов ПЭЭК и углерод-ПЭЭК, комплексное решение материаловедческих и технологических задач для создания научных основ и отработки производства имплантов с заданными физико-механическими характеристиками, сохранение биосовместимых свойств исходных материалов.

Важную роль в развитии производства имплантов в области ортопедии и стоматологии играют современные достижения материаловедения. Если в конце XX почти все импланты производились из инертных и прочных металлов (различные виды нержавеющей стали, титановых сплавов), то в последнее время для изготовления имплантов применяют чаще полимерные материалы, в том числе биополимеры, биодеградирующие полимеры, композитные материалы.

Особенный интерес для трансплантологии представляет материал ПЭЭК. В 2005 году на Европейский рынок вышли биополимерные имплантаты на базе материала PEEK-Optima®, который производит предприятие InVivio® Biomaterial Solutions. Благодаря своим качествам, материал PEEK-Optima® может служить для долгосрочной имплантации. Биополи-

мерный материал ПЭЭК, в отличие от титана, обладает композитной неоднородностью, что позволяет добиться более полного соответствия анатомическим особенностям пациента. Материал биологически совместим, с ним не возникает вопросов о воспалениях, он гипоаллергенный. Кроме того, изготовленные из ПЭЭК имплантаты не вызывают артефактов при МРТ. Имеются результаты испытаний PEEK-Optima® на квазистатическое механическое сжатие и ползучесть разных типов межпозвоночных кейджей. В процессе НИОКР было выяснено, что поверхность импланта имеет большое значение, как с точки зрения его первичной и вторичной фиксации, так и с точки зрения совместимости импланта на границе «поверхность импланта / прилегающая ткань». При процессе формирования межтелового спондиледоза с помощью межтеловых кейджей, решающим фактором является не только конструктивные особенности используемых имплантов, но и в гораздо большей степени, их биомеханические свойства: биосовместимость и модуль упругости. Кейджи из PEEK обладают необходимым модулем упругости и механическими характеристиками.

Следующим поколением имплантов из биополимеров на основе ПЭЭК являются импланты из углерод-армированного ПЭЭК материала, которые находятся в стадии НИОКР и требуют дальнейшего изучения. Это особенно актуально при производстве имплантов для хирургии позвоночника предназначенных для хирургического лечения сколиоза. В этом случае применяются длинные штанги (30—40 см) и транспедикулярные винты, которые в условиях эксплуатации испытывают большие силовые напряжения на сжатие и кручение. Во всех имеющихся на рынке имплантах применяется титан со всеми его негативными последствиями. Применение ПЭЭК материала ограничено из-за нагрузок, превышающие его прочностные характеристики. В то же время применение углерод-армированного ПЭЭК материала позволяет применять «длинные конструкции» в связи со значительным увеличением его силовой выносливости (повышение прочности, упругой деформации) при сохранении всех полезных свойств ПЭЭК материала.

1. Kurtz S.N. and Devine J.M. PEEK Biomaterials in Trauma, Orthopedic and Spinal Implants // Biomaterials. — 2007; 28:4845-69
2. Prochazkova J, Podzimek M., and Tomka M. Metal Alloys in the Oral Cavity as a Cause of Oral Discomfort in Sensitive Patients // Neuro Endocrinol Lett. — 2006 (Suppl.1):53-8(Erratum in Neuro Endocrinol Lett. — 2007 Oct. 2 8 -5)

СЫВОРОТКА КРОВИ КАК БИОЛУБРИКАНТ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КЛИНИЧЕСКОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ОСТЕОАРТРОЗА

В.И. Николаев¹, С.Ф. Ермаков²

¹Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; traumatology@gsmu.by

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение

Остеоартроз (ОА) — общемедицинская и социальная проблема настоящего столетия, обусловленная широкой распространенностью заболевания, которое склонно к быстрому прогрессированию, что приводит к выраженным функциональным нарушениям крупных суставов нижних конечностей [1]. В последние десятилетия в научной литературе обсуждается эффективность внутрисуставного использования плазмы крови, обогащенной тромбоцитами, и сыворотка крови (СК) как заменитель синовиальной жидкости (СЖ) при экспериментальном ОА, а также у пациентов с гонартрозом [2, 3]. Оценка качества жизни (КЖ) как одного из главных критериев эффективности какого-либо метода лечения заболеваний привела к разработке и широкому использованию соответствующих опросников (SF-36, EQ-5D и др.) в комплексе с алгофункциональными индексами (ВАШ, Лекена и т.д.). Такой подход к оценке результатов лечения ряда заболеваний позволяет достаточно объективно обосновать целесообразность предлагаемого метода лечения [4].

Цель работы

Сравнить трибологические характеристики СЖ и СК и оценить эффективность внутрисуставного введения аутосыворотки крови у пациентов и гонартрозом (ГА).

Материалы и методы

Оценка трибологических характеристик СЖ и СК проведена с помощью оригинального электронно-счетного маятникового трибометра на паре трения «хрящ-хрящ». Пациентам с гонартрозом проведено внутрисуставное введение по 5 мл аутосыворотки крови в пораженные коленные суставы с интервалом между инъекциями 1 неделя, количество инъекций от 3 до 5 за 1 курс лечения.

Результаты и обсуждение

Сыворотка крови человека практически идентична по биохимическому составу синовиальной жидкости. Результаты трибологических испытаний СЖ и СК показали, что их коэффициенты трения сопоставимы. Следует считать, что введенная СК в полость сустава, пораженного ОА с нарушенной функцией скольжения, является естественным биолубрикантом и оптимизирует смазочную среду в нем.

При сопоставлении результатов анкетирования по показателям качества жизни и шкалам выраженности болевого синдрома при ГА у пациентов до и после лечения с использованием аутосыворотки крови для интраартикулярного введения были выявлены статистически значимые различия. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Выраженность болевого синдрома и показатели КЖ у пациентов при ГА до и после лечения

Показатель	До лечения	После лечения	Z	p
Физическое функционирование	19(17;20)	21(18;23)	3,408	<0,001
Роловое физическое функционирование	4(4;6)	5(4;6)	2,201	0,028
Интенсивность боли	6,1(5,2;7,1)	8,2(7,2;8,2)	3,724	<0,001
Жизненная активность	13(9;15)	15,5(14;16)	3,621	<0,001
Социальное функционирование	7,5(7;9)	8(7;9)	1,937	0,053
Роловое эмоциональное функционирование	3,5(3;6)	4(3;6)	-	-
Психическое здоровье	16(12;17)	17(16;18)	3,285	0,001
Индекс Лекена	13(11;15)	3,75(2,4;5,1)	3,919	<0,001
Шкала Ликерта I	4(3;5)	2(2;3)	3,919	<0,001
Шкала Ликерта II	4(3;5)	2(2;3)	4,015	<0,001
ВАШ	5,9(5;8)	2,5(1,4;3)	4,015	<0,001

Таким образом, сыворотка крови человека может быть использована как заменитель СЖ в случаях ее дефицита в суставах, а внутрисуставное введение аутосыворотки крови у пациентов с ГА демонстрирует выраженный симптом-модифицирующий эффект по критериям КЖ и алгофункциональным индексам и шкалам.

1. Насонова В.А., Эрдес Ш. О Всемирной декаде костно-

суставных заболеваний 2000—2010 // Научно-практическая ревматология. — 2000, № 4, 14—16

- Kon E., et al. Platelet-Rich Plasma: Intra-Articular Knee Injections Produced Favorable Results on Degenerative Cartilage Lesions // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* — 2010, no. 18, 472—479
- Ermakov S., Beletskii A., Eismont O., and Nikolaev V. Liquid Crystals in Biotribology. — Springer. — 2015
- Андрианова И.А. и др. Комплексная оценка качества жизни больных ревматоидным артритом // Научно-практическая ревматология. — 2006, № 2, 11—17

**КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИСТИРОЛА, СОДЕРЖАЩИЕ
КЛАСТЕРЫ ФУЛЛЕРЕНОВ И ФУЛЛЕРИДОВ МЕТАЛЛОЦЕНОВ**Э.М. Шпилевский¹, Н.П. Кулиш², О.С. Филатова¹, Г. Шилагарди³, П. Тувшинтур³¹Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, Минск, Беларусь, eshpilevsky@rambler.ru³Киевский национальный университет им. Т.Г. Шевченко, Киев, Украина, mpkulish@ukr.net²Национальный университет Монголии, Улан-Батор, Монголия, gshilagardi@yahoo.com

Фуллерены, обладающие большей энергией сродства к электрону, чем акцепторные фрагменты многих полимерных молекул, могут образовывать комплексы с переносом заряда [1]. Комплексы фуллеренов с металлами и металлоценами представляют особый интерес, так как могут обладать антибактериальными свойствами [2, 3].

В представленной работе получены и исследованы композиты на основе полистирола, содержащие кластеры фуллеренов и фуллеридов металлоценов ($\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$, $\text{Ni}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$).

Целью работы является получение композитов на основе полистирола и наночастиц фуллеридов C_{60} , а та же полистирола и наночастиц ферроцена ($\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$) или никелецена ($\text{Ni}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$), установление закономерностей влияния типа наночастиц, их размеров и концентрации на физико-технические и антибактериальные свойства, выявление возможностей применения.

Молекулы фуллерена C_{60} и фуллеридов металлоценов вводились в полимерную матрицу смешиванием растворов полистирола и фуллеренов в толуоле или растворов полистирола и фуллеридов ферроцена ($\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$) или никелецена фуллеридов ($\text{Ni}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$). Последующее длительное перемешивание обеспечивало сравнительно равномерное распределение их по объему. Долевое содержание компонентов композита задавалось весовыми дозами полимера и наполнителя, растворенных в одинаковых объемах растворителя до их смешивания. Пленки композитов наносились на стеклянные подложки методом центрифугирования.

Показано, что введение в полистирол фуллеренов в и их комплексов приводит к появлению неспаренных электронов, что свидетельствует о взаимодействии фуллеренов с полимерной матрицей.

Установлено, что допирование полимеров фуллеренами и их комплексами с металлоценами приводит к изменению физико-механических и оптических свойств материала. Свойства композитов зависят от долевого содержания введенных наночастиц и технологических условий приготовления (концентрации раствора, длительности пропитки, температуры сушки).

Установлено, что наполнители влияют на условия надмолекулярного структурообразования полистирола, изменяя состояние полимера на поверхности частиц наполнителя. Кроме того, фуллеритовые

кластеры проявляют способность сами структурироваться в полимерной матрице.

Показано, что фуллерид ферроцена $\text{C}_{60}(\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5)_2)_2$ ускоряет рост клеточных культур *gin-mf5*, что может найти применение как в диагностических методиках, так и для ускорения биотехнологических процессов (например, для ускорения роста дрожжей). Установлено, что фуллерид никелецена $\text{C}_{60}(\text{Ni}(\text{C}_6\text{H}_5)_2)_2$ замедляет пролиферацию клеточных культур *gin-mf5*, что может найти его применение в качестве бактерицидного препарата. Таким образом, получены и исследованы композиты на основе полистирола, содержащие кластеры фуллеритов C_{60} и фуллеридов металлоценов ($\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$, $\text{Ni}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$), выявлены их физико-технические и антибактериальные свойства, особенность их структуры для разных долевых соотношений компонентов.

Свойство фуллеридов металлоценов влиять на процессы жизнедеятельности могут быть широко использованы в медицине, как для лечения, так и ранней диагностики различных вирусных заболеваний, в том числе злокачественных опухолей. Кроме того, фуллериды, замедляющие пролиферацию клеточных культур могут найти применение в качестве бактерицидных препаратов, а ускорение пролиферации — в препаративной цитологии для разведения клеточных культур, либо, например, для ускоренного восстановления поврежденных органов и тканей у человека и животных.

Работа выполнена в рамках международного сотрудничества между Институтом тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Национальным университетом Монголии и Киевским национальным университетом им. Т.Г. Шевченко (коды проектов T15MH-001 и Ф16K-075).

1. Гладченко С.В., Полоцкая Г.А., Грибанов А.В., Згонник В.Н. Исследование твердофазных композиций полистирол-фуллерен // Журнал технической физики — 2002 (72), № 1, 105—109
2. Shpilevsky E.M., Filatov S.A., Shilagardi G., Tuvshintur P., Bogorosh A.T. Fullerides of Metals // Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Modern Applications of Nanotechnology Minsk, Belarus, 6—8 May 2015. Minsk: A.N.Varaksin. — 2015, 31—33
3. Шпилевский Э.М., Филатов С.А., Тувшинтур П., Шилагарди Г. Физические и физико-химические свойства металл-фуллереновых пленок, полученных вакуумными технологиями // Вакуумная техника, материалы и технология. — М.: НОВЕЛЛА. — 2017, 202—206

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕМБРАН ЭРИТРОЦИТОВ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Г.Б. Мельникова¹, Т.Н. Толстая¹, Е.Э. Константинова¹, С.А. Чижик¹, Н. Антонова²

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь, galachka@gmail.com

²Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария

Введение. В связи с развитием технологий микрокапсулирования, адресной доставки лекарственных веществ вопросы изучения влияния наночастиц, на основе которых и создаются микрокапсулы, на структурно-механические свойства мембран биологических клеток являются актуальными.

Цель — изучить влияние наночастиц полиакриловой кислоты на структурно-механические свойства мембран эритроцитов и тромбоцитов методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Материалы и методы. Эритроциты для исследования методом АСМ выделяли из стабилизированной этилендиаминтетраацетатом калия венозной крови пациентов с сахарным диабетом 2 типа (СД2). Средний возраст пациентов $55,6 \pm 5,2$ года (60 чел.). Для изучения воздействия наночастиц к 0,5 мл выделенных эритроцитов добавляли 20 мкл раствора наночастиц полиакриловой кислоты (ПАК). Инкубирование наночастиц с красными клетками крови проводили в течение 20, 40 и 60 мин. Используемые полимерные наночастицы — растворы звездообразного полимера с M_n 57000 и линейной ПАК с M_n 6000, 20000, 225000 Да ($c = 0,2$ и 1 мг/мл) в 0,9% растворе хлорида натрия. Наночастицы имели сферическую форму с гидродинамическим радиусом 14 нм. Клетки фиксировали 0,5% раствором глутарового альдегида на подложках слюды.

Изменение модуля упругости и силы адгезии проводили на атомно-силовом микроскопе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) с использованием стандартных кремниевых зондов NSC 11, жесткость 3 Н/м («MikroMasch»), радиус кривизны 50 нм.

Результаты и обсуждение. Исследования структуры методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии показали, что после инкубирования красных клеток с раствором наночастиц следов ПАК на мембране не обнаружено. Данный факт свидетельствует о полном отмывании эритроцитов после инкубирования и отсутствии взаимодействия между наночастицами ПАК и функциональными группами веществ, входящих в состав мембран клеток.

Для сравнения значений модуля упругости группа пациентов СД2 была разделена на две подгруппы — мужчин и женщин. Показано, что независимо от пола значения локального модуля упругости

мембран эритроцитов составляет $96,0 \text{ МПа} \pm 15\%$.

В результате инкубирования клеток мужчин и женщин с наночастицами ПАК $M_n = 20\,000$ Да и $225\,000$ Да ($c = 0,2$ мг/мл) в течение 40 мин установлены значительные изменения модуля упругости (порядка 50%). Следует отметить, что для мембран клеток женщин значения силы адгезии значительно возросли (на 40%) с увеличением времени инкубирования до 60 мин с раствором наночастиц ПАК $M_n = 57\,000$ Да и линейным полимером с $M_n = 225\,000$ Да и уменьшались — с наночастицами ПАК $M_n = 6000$ Да.

Влияние наночастиц ПАК с M_n 6000 Да ($c = 1$ мг/мл) также присутствует после их воздействия в течение 60 мин (26%) в двух подгруппах пациентов. При меньшем времени инкубирования изменения значений модуля упругости и силы адгезии не превышают среднестатистического разброса. Значения локальной силы адгезии монотонно уменьшаются. В результате воздействия раствора наночастиц в течение 40 мин достоверно значимых изменений модуля упругости не установлено.

В результате воздействия раствора звездообразных наночастиц ПАК с M_n 57 000 Да ($c = 0,2$ и 1 мг/мл) при различном времени инкубирования не установлено изменений структурно-механических свойств мембран клеток пациентов СД2. Данные наночастицы могут быть в дальнейшем использованы в качестве носителей активных лекарственных веществ.

Для исключения влияния растворителя, в котором находятся наночастицы, дополнительно было проведено исследование влияния физиологического раствора на свойства эритроцитов. В отличие от модуля упругости после инкубирования с физиологическим раствором сила адгезии несколько уменьшилась, что связано с изменением заряда на поверхности клеточной мембраны. Таким образом, можно предположить, что изменения свойств клеточной мембраны, описанные выше, связаны с влиянием наночастиц ПАК, их структурой и взаимодействием с компонентами мембран эритроцитов

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии», задание Энергетические системы, процессы и технологии — 2.2.

МУЛЬТИСЛОЙНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИГЕКСАМЕТИЛЕНГУАНИДИНА И КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.Н. Красковский¹, В.А. Добыш¹, Н.А. Белясова², В.И. Куликовская¹, В.А. Тарасевич¹

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; kulikouskaya@gmail.com

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Введение. Защита различных поверхностей от биообрастания является актуальной задачей современного материаловедения, так как ежегодные потери от биоповреждений в ряде промышленно развитых стран исчисляются миллиардами долларов [1]. Один из путей решения этой проблемы — нанесение на поверхность тонких антибактериальных пленок, обладающих длительным защитным эффектом и позволяющим исключить попадание бактерицида в окружающую среду, тем самым обеспечивая экологическую безопасность.

Цель работы — сформировать мультислойные покрытия на основе полигексаметиленгуанидина (ПГМГ) и карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и изучить их физико-химические и антибактериальные свойства.

Материалы и методы. ПГМГ синтезировали поликонденсацией гидрохлорида гуанидина и гексаметилендиамина. Мультислойные пленки получали методом послойного осаждения путем чередующейся адсорбции ПГМГ и КМЦ. Морфологию и шероховатость (Rms) покрытий исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, MultiMode Nanoscope III). Износоустойчивость пленок изучали на микротрибометре возвратно-поступательного типа RPT-02 (индентор — шарик 3 мм, приложенная нагрузка 0,3 Н; длина трека 3 мм, линейная скорость 4 мм/с). Поверхностную бактерицидную активность покрытий определяли по стандарту JIS Z 2801:2000.

Результаты и обсуждение. Получены пленки (ПГМГ/КМЦ)_n/ПГМГ (n = 0÷9) с заданной наноразмерной толщиной до 22 нм и показано, что они являются однородными и бездефектными с низкой шероховатостью (рис. 1, табл.).

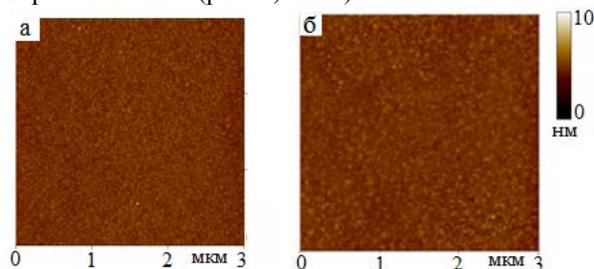


Рис. 1. АСМ-изображение монослоя ПГМГ (а) и пленки (ПГМГ/КМЦ)₉/ПГМГ (б)

Установлено, что вне зависимости от числа слоев все сформированные покрытия являются гидрофильными (табл.). Для пленок

(ПГМГ/КМЦ)_n/ПГМГ (n = 1—9) характерен невысокий коэффициент трения (0,20—0,22), а их износоустойчивость повышается с увеличением числа слоев: монослой ПГМГ выдерживает менее 10 циклов скольжения, а мультислой (ПГМГ/КМЦ)₄/ПГМГ и (ПГМГ/КМЦ)₉/ПГМГ — 50 и 600 циклов соответственно (рис. 2).

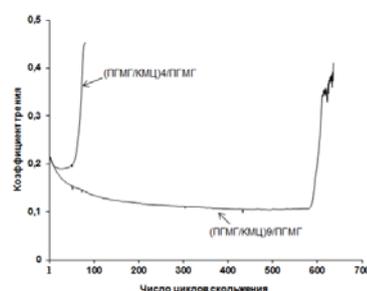


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения пленок на основе ПГМГ от числа циклов скольжения

Показано, что антибактериальные свойства пленок в отношении *Staphylococcus aureus* также зависят от числа слоев: мультислой (ПГМГ/КМЦ)₄/ПГМГ и (ПГМГ/КМЦ)₉/ПГМГ: обеспечивают снижение концентрации жизнеспособных клеток более чем на 2 порядка (табл.).

Таблица. Свойства пленок на основе ПГМГ и КМЦ

Образец	Rms, нм	Θ, град.	Показатели антибактериальных свойств	
			С клеток (КОЕ/мл)	Показатель редукции
Контроль	—	—	$6,7 \cdot 10^5$	—
ПГМГ	0,3	39,1	$2,9 \cdot 10^5$	0,36
(ПГМГ/КМЦ) ₄ /ПГМГ	0,2	30,8	$1,4 \cdot 10^3$	2,68
(ПГМГ/КМЦ) ₉ /ПГМГ	0,3	28,0	$1,3 \cdot 10^3$	2,71

Таким образом, полученные пленки (ПГМГ/КМЦ)₄/ПГМГ и (ПГМГ/КМЦ)₉/ПГМГ могут быть использованы для защиты поверхностей от биообрастания, в том числе изделий, которые испытывают трение в процессе эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект X15B-002).

1. Терентьев В.И., Караван С.В., Павловец Н.М. Борьба с коррозией в системах водоснабжения. — СПб.: Проспект Науки. — 2007

ГИДРОГЕЛЕВАЯ СИСТЕМА ДОСТАВКИ КУРКУМИНА НА ОСНОВЕ ЧАСТИЦ КОНЬЮГАТА ХИТОЗАНА С ФОЛИЕВОЙ КИСЛОТОЙ

М.Э. Лозовская, В.И. Куликовская, В.Е. Агабеков

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; lozovskaya.marina@ Rambler.ru

Введение. Куркумин — полифенол, входящий в состав корня куркумы и обладающий антиокислительными, противовоспалительными, противовирусными и противомикробными, противоканцерогенными и иммуностимулирующими свойствами, подавляет пролиферацию широкого спектра опухолевых клеток [1]. Однако применение куркумина ограничено его слабой растворимостью в воде, низкими биодоступностью и сорбцией желудочно-кишечным трактом, быстрым метаболизмом. Для увеличения биодоступности куркумина и его растворимости в водных средах его включают в различные носители: липосомы, полимерные микро- и наночастицы, биоразлагаемые микросферы и гидрогели. Перспективными носителями для целевой доставки куркумина являются гидрогелевые полисахаридные наночастицы, модифицированные фолиевой кислотой (ФК), которая является вектором нацеливания на злокачественные клетки.

Цель работы — получение наночастиц конъюгата хитозана с фолиевой кислотой (Х-ФК), содержащих куркумин.

Материалы и методы. В работе использовались: хитозан ($M_v \sim 800$ кДа, степень дезацелирования — 75,4%), фолиевая кислота, 1-этил-3-(3-диметил-аминопропил)карбодимид гидрохлорид, куркумин (степень чистоты > 95%). Конъюгаты хитозана с фолиевой кислотой (Х-ФК) получали карбодимидным методом [2]. Синтезированы конъюгаты со степенью пришивки фолиевой кислоты к хитозану (CR) 0,9 и 5,5%. Нано- и субмикрочастицы Х-ФК получали методом ионотропного гелеобразования [3]. Куркумин включали в частицы Х-ФК путем сорбции из его водно-спиртовых ($C_2H_5OH:H_2O = 2:1$) растворов. Концентрацию куркумина варьировали в диапазоне 0,25 ÷ 1 мг/мл.

Результаты и обсуждение. При сорбции куркумина в частицы Х-ФК с повышением концентрации его раствора с 0,25 до 1,0 мг/мл эффективность включения (ЭВ) увеличивается с 8 до 35% и с 10 до 47% для частиц со степенью модификации хитозана фолиевой кислотой 0,9% и 5,5% соответственно (табл. 1). Растворы с концентрацией выше 1,0 мг/мл не использовались в связи ограниченной растворимостью куркумина в этиловом спирте и водно-спиртовых растворах. Невысокие (< 50%) значения эффективности включения могут быть обусловлены отсутствием электростатического взаимодействия между незаряженным куркумином и положительно заряженными частицами Х-ФК, то есть включение происходит, вероятно, преимущественно за счет механического внедрения биологически активного вещества (БВ) в гидрогелевую сетку частиц. Сле-

дует отметить, что увеличение содержания гидрофобного фрагмента (ФК) в полисахаридных частицах приводит к повышению эффективности включения в них куркумина (табл. 1). Это может быть связано с тем, что гидрофобные взаимодействия между бензольными кольцами куркумина и бензольным и птеридиновым кольцами фолиевой кислоты конъюгата также способствуют удержанию БАВ в носителе. Таким образом, путем адсорбции куркумина в гидрогелевые частицы Х-ФК можно получить носители, содержащие до 12 мас.% действующего вещества (табл. 1).

Таблица 1. Эффективность включения куркумина в частицы Х-ФК

$C_{\text{куркумина}}$, мг/мл	Степень пришивки ФК к хитозану в частицах, %			
	0,9		5,5	
	ЭВ, %	Содержание куркумина в частицах, мас.%	ЭВ, %	Содержание куркумина в частицах, мас.%
0,25	8,0±2,0	1,8±0,5	10,3±2,2	0,9±0,1
0,50	15,9±1,9	3,0±1,0	19,9±2,7	2,8±0,6
0,75	24,2±14,6	4,3±2,1	30,7±13,9	5,2±2,5
1,00	34,9±7,1	10,9±4,3	47,4±4,3	12,0±0,6

Значения ζ -потенциала для частиц Х-ФК со степенью пришивки 0,9% и 5,5% составляет 29,4±1,9 мВ и 26,8±1,9 мВ соответственно. Включение куркумина не оказывает существенного влияния на величину ζ -потенциала частиц (табл. 2).

Таблица 2. Значения ζ -потенциала частиц Х-ФК после включения куркумина

$C_{\text{куркумина}}$, мг/мл	ζ -потенциал, мВ	
	CR = 0,9%	CR = 5,5%
0,25	28,5 ± 1,4	24,8 ± 2,6
0,50	28,6 ± 2,0	25,0 ± 5,7
0,75	28,2 ± 0,8	25,1 ± 4,0
1,00	33,1 ± 7,3	28,1 ± 1,1

Получена капсулированная форма куркумина, содержащая до 12 мас.% действующего вещества, в виде гидрозоля.

1. Thangapazham R.L., Sharma. A., and Maheshwari R.K. Multiple Molecular Targets in Cancer Chemoprevention by Curcumin // AAPS J. — 1983 (183), 116—122
2. Лозовская М.Э., Куликовская В.И. Формирование гидрогелевых субмикронных частиц конъюгата хитозана с фолиевой кислотой // «Молодежь в науке-2014»: приложение к журналу «Вестн НАН Беларуси». Ч. 1, сер. хим. наук. — 2014, 28
3. Masalova O., Kulikouskaya V., and Shutava T. Alginate and Chitosan Gel Nanoparticles for Efficient Protein Entrapment // Physics procedia — 2013 (40), 69

COMPUTER CONTROLLED ARTICULATOR DRIVEN BY PATIENT'S SPECIFIC TMJ KINEMATICS OBTAINED FROM JAW TRACKING DEVICE FOR THE PURPOSE OF TESTING AND ANALYSIS OF DIFFERENT MATERIALS IN BIO-MECHANICAL APPLICATIONS

Yevsey Gutman and John Keller

DDS GnathTech, Minneapolis, USA

It has been a known challenge in dentistry for a long time: to develop an accurate, repeatable, and reliable device to duplicate existing or produce any arbitrary realistic jaw movement. During this replication a set of casts: one for each jaw should be made to represent the patient's specific jaws. It can be done in the virtual world in the form of Virtual Occlusion, or in the real environment on a mechanical (physical) articulator. A number of manual mechanical articulators have been developed and built during the last 50 years in attempt to duplicate the TMJ movement. GnathTech (GT) has developed a new generation of computer controlled Electro-Mechanical Articulators to fully utilize the information obtained from its Digital Recorder for Dynamic Occlusion.



GnathTech Computer controlled E-M Articulator

Electro-Mechanical Computer Controlled Articulator, developed by GT, was designed to duplicate any patient's specific recorded motion as well as any other TMJ "trajectory" generated by a semi-adjustable mechanical articulator with a given setup. This device is designed and fabricated as a computer controlled system where a network of servo controlled axes deliver a smooth and continues motion to the lower jaw model by a multi-degree of freedom suspension linkage. GT E-M articulator can be programmed to accept the recorded motion as well as a simulator of any existing mechanical articulator. The heart of the motion control strategy of this articulator (which is based on a linkage with highly cross-coupled DOFs) is a proprietary Virtual Articulator Kinematics Engine developed and tested first to control the motion of this E-M articulator which became the foundation for the Virtual Articulation Server. This device can be programmed to perform a durability test of the dental work or material by running the articulator under different modes 24/7.

Durability Test. The computer controlled Articulator with "real" pre-recorded information can also be used in the "playback mode" to perform a durability testing of material used in dentistry. For this application, it can be equipped with a pair of casts instrumented with strain gauges installed in various locations under the individual stone teeth. Those sensors can monitor the true loads at any location. This test can be performed 24/7 at length (for hours, days and months) and different speed to monitor the property of selected materials. The Articulator can be used with some real food or any medium desired. That would allow dentists to observe wear, breakage, etc. Those tests can be extended to investigate the influence of the properties of different materials on finishing work as well.

НОВЫЕ ПОЛИМЕРНО-ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

В.И. Дубкова¹, А.В. Караваева², М.В. Соловский³,
Е.Ф. Панарин³, О.И. Маевская, Н.А. Белясова

¹ НП ООО «МЕДБИОТЕХ», Минск, Беларусь; dubkovav52@gmail.com

² Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия (СПГХФА), Санкт-Петербург, Россия

³ Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время в связи с широким распространением лекарственно-устойчивых форм бактерий, изменением иммунологического статуса организма и резким ухудшением экологической обстановки особую актуальность приобретает борьба с гнойной инфекцией кожных покровов госпитального и негоспитального происхождения. В связи с этим возникает острая необходимость в антимикробных материалах. Особую ценность среди них приобретают антимикробные материалы на текстильных носителях.

Ранее нами были разработаны полимерно-волокнистые композиционные материалы (ПВКМ) на тканевой основе с иммобилизованными на их поверхностях биологически активными полимерными комплексами на основе сополимеров акриламида с акриловой и метакриловой кислотами и антибиотиков—аминогликозидов, а также антибиотика гентамицина основания [1]. Биологические испытания ПВКМ показали, что они нетоксичны *in vitro* и обладают выраженными антибактериальными свойствами, подтверждёнными как в экспериментах с санитарно-показательными штаммами бактерий (*Escherichia coli*, *Salmonella* sp., *Staphylococcus* sp.), так и при лечении раневой инфекции. Прогрессирующее снижение эффективности антибиотикотерапии и возрастание потребности в лечебных материалах не исключает проблему поиска и разработки новых антисептических средств широкого спектра антимикробного действия для профилактики и лечения раневой и ожоговой инфекции. Представляет интерес использовать для этих целей не менее перспективное, но более дешёвое антисептическое средство КАТАПОЛ.

Цель работы — исследование антимикробной активности ПВКМ с иммобилизованным на их поверхностях антисептическим препаратом КАТАПОЛ.

Материалы и методы. В качестве подложки при иммобилизации КАТАПОЛА использовали фосфорсодержащую целлюлозную и углеродную ткани (ФЦТ и ФУТ соответственно) и углеродный нетканый сорбент (УНС). Сорбцию препарата проводили из водных растворов различных концентраций.

Результаты и обсуждение. Антимикробную активность определяли методом радиальной диффузии в агар по ГФ XII (ОФС 42-0068-07). Использовали следующие тест-микрорганизмы: *Staphylococcus aureus* ATCC 209P — как представителя условно-патогенных грамположительных бактерий и *Escherichia coli* ATCC 25922 — как представителя условно-патогенных грамотрицательных бактерий из музея кафедры микробиологии СПГХФА. Для посева использовали суточную культуру тест-микрорганизмов, выращенных на скошенном мясопептонном агаре (МПА). Микробная нагрузка на чашку Петри составляла 10^8 клеток (5×10^5 клеток/мл). От каждого образца отрезали 3 части размером 1×1 см (1 см^2) и накладывали на засеянную чашку Петри с МПА. Результаты после инкубации чашек Петри при 37°C в течение 2 суток приведены в таблице.

Таблица. Антимикробная активность ПВКМ с иммобилизованным на поверхности КАТАПОЛОМ в отношении *S. aureus* и *E. coli*.

ПВКМ	C, мг/см ²	L, мм	
		<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>
ФУТ	5,7	$10,7 \pm 1,2$	$8,6 \pm 0,4^*$
	19,4	$10,7 \pm 0,6$	$10,9 \pm 1,0$
УНС	56,3	$9,3 \pm 0,6$	$8,3 \pm 0,8$
	67,5	$10,0 \pm 1,0$	$8,6 \pm 1,0$

Обозначение: C — содержание катапола; L — величина задержки роста микроорганизма, мм

Заключение. Грамположительные бактерии более чувствительны к действующему веществу в составе ПВКМ, чем грамотрицательные. Исследования оптимальных вариантов ПВКМ с иммобилизованным на их поверхностях КАТАПОЛОМ показали, что зоны ингибирования роста грамположительных бактерий *S. aureus* 6538 и *Bacillus subtilis* 168 вокруг образцов ПВКМ могут колебаться в диапазоне 23—26 мм, что дает право отнести разработанные ПВКМ к материалам с выраженными антибактериальными свойствами.

1. Solovskii M.V., Dubkova V.I., Krut'ko N.P., Panarin E.F., et al. Antimicrobial Activity of Carbon Fiber Fabric Modified with a Polymer-Gentamicin Complex // Applied Biochemistry and Microbiology. — 2009 (45), no. 2, 226—228

БИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЭНДОПРОТЕЗА КРОВЕНОСНОГО СОСУДА

К.В. Овчинников², Т.Ф. Овчинникова², Е.А. Цветкова¹, И.Ю. Ухарцева³, Ж.В. Кадолич³

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
ov-kv@mail.ru

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

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

Введение. Важными для создания эндопротезов сосудов, функционирующих в контакте с кровью, являются гемосовместимость и моделирование биофизических свойств живых тканей. Материалы для таких изделий должны:

- не провоцировать образование тромбов и тромбоэмболии;
- не активировать свертывающую, фибринолитическую и систему комплемента;
- не оказывать отрицательного воздействия на молекулярные (в первую очередь белковые) и форменные элементы крови;
- не нарушать электролитический состав крови;
- не оказывать токсическое, аллергенное, канцерогенное и т.п. действие за счет выделяющихся веществ.

Для создания подобных систем обычно используют нетоксичные материалы, обладающие большой прочностью и эластичностью, чтобы выдержать давление, создаваемое током крови.

Цель работы — разработка матрицы для создания крупных кровеносных сосудов, имитирующей их строение и функции.

Объект, предмет, материалы и методы исследования. Экспериментальные образцы матрицы для эндопротезов сосудов получали из водных коллоидных композиций, содержащих поливиниловый спирт (ПВС), хитозан, глицерин и антикоагулянты, подвернутых криообработке и модифицированию в физических полях по стандартной методике получения термо- и короноэлектретов. Образцы представляли собой пленочные материалы и многоуровневые системы, моделирующие свойства кровеносных сосудов.

Результаты и обсуждение. Спектры термостимулированных токов (ТСТ) свидетельствуют о протекании в исследуемых образцах электрической деполяризации. Это, в свою очередь, означает, что структура образцов, полученных из вышеуказанных коллоидных систем, предполагает участие в их формировании поляризационных механизмов. Спектры ТСТ интерпретированы с позиций представлений о том, что надмолекулярная структура исследуемых образцов содержит электрически активные элементы — связанные диполи.

Формирование диполей обусловлено специфическими взаимодействиями в системе «ПВС—вода», интенсивность которых можно регулировать путем криообработки. Определенную роль также играет собственное электретное состояние хитозана. Материал на основе криогеля ПВС в связи с высоким значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 3,0$) способен сохранять поляризационный заряд во времени, т.е. является стабильным электретом. Путем варьирования рецептурного состава, условий криообработки и электрофизического модифицирования электретное состояние подобных образцов может быть изменено в направлении, желательном с точки зрения обеспечения биосовместимости в контакте с тканями живых организмов. Композиционный материал моделирует биофизические свойства кровеносного сосуда за счет формирования водонерастворимого сшитого эластичного криогеля (с малой микронеровностью поверхности), электретного заряда (усиливает взаимодействия в системе, облегчает структурирование композита и обеспечивает биосовместимость), а также микропористой сетки, ячейки которой могут быть использованы для иммобилизации лекарственных средств.

Заключение. В работе продемонстрирована возможность формирования материала на основе высокомолекулярных соединений природного и синтетического происхождения для изделий медицинского назначения. Системы, содержащие ПВС, воду и хитозан, являются композиционными органическими электретами, имитирующими биофизические свойства кровеносных сосудов. Создание электретного заряда отрицательной полярности на внутренней поверхности искусственного сосуда при имплантации последнего в организм человека будет способствовать повышению гемосовместимости и снижению тромбообразования в сердечно-сосудистой системе.

Предложенный композиционный материал с многоуровневой структурой и приемлемым комплексом биофизических свойств является перспективным для медицинских приложений, причем его формирование может быть осуществлено методом 3D-печати.

КОНТРАСТИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИТОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Т.Г. Шутова¹, С.А. Хоружик², В.В. Паньков³, К.С. Ливонович¹

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; shutova@ichnm.basnet.by

²РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. В последние годы становятся очевидными преимущества использования магнитных наночастиц (МНЧ) для биомедицинских целей.

Цель работы — определение контрастирующих свойств наночастиц ферритов, модифицированных полиэлектrolитными оболочками, и оценка возможности их применения для контрастирования изображений магнитно-резонансной томографии (МРТ).

Материалы и методы. Твердые растворы феррита $Mg_{0,12}Fe_{2,8}O_4$ синтезированы соосаждением карбонатом или щелочью [1]. МНЧ, модифицированные поли(диаллилдиметиламмоний хлоридом) (ПДДА), сополимерами хитозана 18 кДа и полиэтиленгликоля 5 кДа (Х2-ПЭГ), хитозана 60 кДа и декстрана 6 кДа (Х3-Дек), получали диспергированием феррита в растворе полиэлектrolита [1]. Мультислоиные оболочки на основе поли(стиролсульфоната) (ПСС), декстран сульфата (ДекС) и альбумина (БСА) формировали на наночастицах методом послойной сборки [2]. Гидродинамический диаметр МНЧ по интенсивности светорассеяния находится в диапазоне 110—220 нм в зависимости от структуры оболочки.

Измерение контрастирующих свойств МНЧ проводили на магнитно-резонансном томографе с индукцией магнитного поля 1,5 Тесла производства GeneralElectric, США при температуре 25 ± 1 °С. Исследование включало стандартные последовательности импульсов TR (время повторения) и TE (время эхо) для получения структурных T1- и T2-взвешенных изображений, которые анализировали с помощью пакета DICOM Viewer. Для сравнения использован раствор гадолинийсодержащего контрастного средства «Омнискан» с концентрацией 0,05 ммоль/мл.

Результаты и обсуждение. Интенсивность сигнала МНЧ, модифицированных полиэлектrolитной оболочкой, зависит от их концентрации. На T1-взвешенных изображениях МНЧ/ПДДА и МНЧ/ХД-Дек в концентрации 0,1 мМ в пересчете на Fe увеличивают, а в концентрации 6 мМ уменьшают яркость (I) водных растворов. Влияние МНЧ/ПДДА в концентрации 1,0 мМ зависит от способов синтеза наночастиц, которые определяют величину их намагниченности [1]. Полученные карбонатным синтезом МНЧ с диаметром кристаллитов около 20 нм уменьшают, а полученные соосаждением щелочью с диаметром около 10 нм — увеличивают яркость растворов. На T2-взвешенных изображениях

яркость водных растворов с МНЧ/ПДДА и МНЧ/ХД-Дек уменьшается.

Модифицированные мультислоиной оболочкой МНЧ увеличивают I водных растворов на T1- взвешенных изображениях, в то время как для МНЧ, на поверхности которых адсорбирован один слой поликатиона (ПДДА или ХД-Дек), характерно уменьшение яркости соответствующей области.

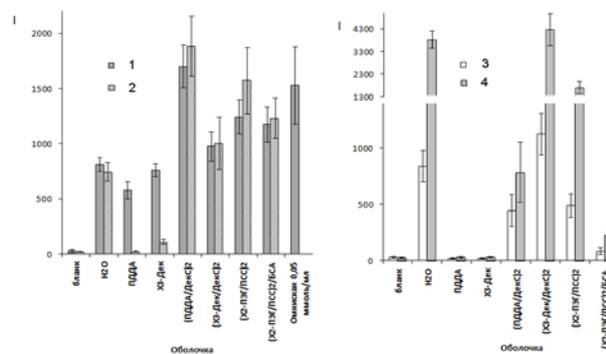


Рис. 1. Интенсивность сигнала воксельной области водных растворов МНЧ с оболочками различной структуры на T1- (а) и T2- (б) взвешенных изображениях. TR/TE, мс/мс: 1 — 180/4,2; 2 — 640/12; 3 — 2400/100,7; 4 — 7000/109,7. C = 1 мМ.

Уменьшение I водных растворов на T2- взвешенных изображениях МНЧ с мультислоиными оболочками менее выражено, чем для МНЧ/ПДДА или МНЧ/Х3-Дек, а для МНЧ/(Х3-Дек/ДекС)₂ яркость растворов усиливается.

Таким образом, МНЧ, модифицированные полиэлектrolитными оболочками, перспективны для разработки препаратов для контрастирования T1- и T2- взвешенных изображений МРТ.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект X15MC-018).

1. Паньков В.В., Шутова Т.Г., Ливонович К.С., Котиков Д.А., Петрова Е.Г., Натаров В.О., Труханов С.В. Наночастицы $Mg_xZn_yFe_{3-x-y}O_4$: синтез, магнитные свойства, функционализация поверхности // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. — 2017, № 2
2. Шутова Т.Г., Паньков В.В., Котиков Д.А., Петрова Е.Г., Натаров В.О., Ливонович К.С., Богачев Ю.В., Никитина А.В., Костина А.А., Сабитова В.А. ЯМР релаксационная эффективность композитных магнитных наночастиц $Mg_xZn_yFe_{3-x-y}O_4$ / полиэлектrolитная оболочка для медицинской диагностики // Журнал БГУ. Химия. — 2017, № 1, 11—15
3. Shutava, R. Fakhruddin, Y. Lvov Spherical and Tubule Nanocarriers for Sustained Drug Release // Current Opinion in Pharmacology. — 2014 (18), no. 1, 141—148

БИОЦИДНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПВХ И СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ЭПОКСИЦИКЛОПРОПАНОВ

Р.З. Шахназарли¹, Г.А. Рамазанов², А.М. Гулиев¹

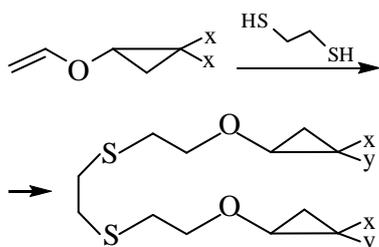
¹Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; shahnazarli@mail.ru

²Сумгайтский Государственный Университет, Сумгайыт, Азербайджан

Введение. Известно, что соединения, проявляющие активность по отношению к различным микроорганизмам, в большинстве случаев содержат в своих молекулах реакционноспособные функциональные группы и гетероатомы [1].

Известно также и то, что в последние годы проводятся широкие исследования, направленные на применение реакций функционализации и модификации макромолекулярных структур. Один из удобных методов функционализации макромолекул, содержащих ненасыщенные связи — реакции с тиолами, так называемые «click»-реакции, которые характеризуются высокой степенью регио- и стереоизбирательности и протекают в мягких условиях и с высокими выходами целевых продуктов [2]. Реакции свободнорадикального присоединения тиолов к соединениям, имеющим кратную $C=C$ связь (реакции тиолирования), относятся к этой категории реакций.

Цель. С целью синтеза активных добавок к полимерам и использования их при изготовлении композиционных материалов, мы осуществили реакцию присоединения этандитиола к моно- и *гем*-диглицидилоксикарбонил- и *гем*-диглицидилоксиметилзамещенным винилоксициклопропанам в присутствии радикальных инициаторов [3]:



$x=H, y=CO_2Гл$ (1); $x=H, y=CH_2OГл$ (2);

$x=y=CO_2Гл$ (3); $x=y=CH_2OГл$ (4)



Материалы и методы. Исходные эпоксициклопропаны были синтезированы из соответствующих винилоксизамещенных циклопропанкарбонновых кислот и циклопропилкарбинолов путем взаимодействия их с эпихлоргидрином. Исходные соединения и полученные из них реакцией тиолирования аддукты были охарактеризованы методами хи-

мического и спектрального анализов.

Для разработки композиций брали ПВХ марки С-70. Процесс проводили при температуре 170 °С, физико-механические испытания композиций осуществляли по ГОСТ 11262-80, а биологическую активность композиций определяли по ГОСТ 9.049-91.

Результаты и обсуждение. С целью получения биоцидных композиций на основе ПВХ с использованием соединений, имеющих в своих молекулах карбонильные группы, простую эфирную связь, эпоксидные и циклопропановые кольца, а также атомы серы, мы использовали эти соединения в качестве активной добавки в составе композиций в различных количествах (2÷6 мас.ч. на 100 мас.ч. ПВХ) [4].

В результате физико-механических испытаний полимерных композиций, изготовленных на основе ПВХ с использованием синтезированных соединений было выявлено, что улучшение эксплуатационных свойств связано с особенностями химической структуры использованных добавок.

Было найдено, что используемые в составе композиции аддукты придают им одновременно несколько дополнительных свойств, а именно: термостабильность, эластичность, биоцидную и стабилизирующую активность.

Было обнаружено, что изготовленные композиции проявляют улучшенные показатели по реологическим свойствам и имеют повышенную эластичность и морозостойкость. Следовательно, аддукты — серосодержащие эпоксициклопропаны, в составе композиции на основе ПВХ оказывают также пластифицирующее и стабилизирующее действие, а сами композиционные материалы проявляют биоцидную активность.

1. Pospišil J. and Brodilova J. Biostabilisatoren — Spezifische Stabilisatorenklasse für Synthetische Polymere // Plaste u. Kautschuk. — 1984 (31), no. 11, 401—404
2. Colb H.C., Finn M.G., and Sharpless K.B. Click Chemistry: Diverse Chemical Function from a Few Good Reactions // Angew. Chem. Int. Ed. — 2001 (40), no. 11, 2004—2021
3. Шахназарли Р.З. Биоцидные добавки для поливинилхлорида на основе винилциклопропиловых эфиров // European Science Review. — 2014, № 2, 35—39
4. Шахназарли Р.З. Биоцидная композиция на основе ПВХ с использованием циклопропансодержащих тиоэфиров. // Поликомтриб-2015: Тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2015, 273

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Akpan Emmanuel I.....	32	Аскеров О.В.....	110
Andriušis A.	127	Асташинский В.М.....	167
Antonov M.	125	Аткин В.С.	120
Borodich Feodor M.	6	Ахвердиев К.С.....	57, 58
Chen Y.Y.....	33	Ахметов Т.А.	157
Choteborsky R.....	125	Бабич В.Д.....	51
Friedrich K.	5	Бабушкин М.О.....	149
Friedrich Klaus.....	32	Багдасарян А.Э.....	48, 156
Gohs U.....	178, 194	Багирова Ш.И.....	115
Grakovich P.N.....	194	Баный В.А.....	85
Gutman Yevsey.....	223	Бардушкин В.В.....	195
Hornig J.H.	33	Басалай А.В.	167
Jankauskas V.	125	Басинюк В.Л.	46
Katinas E.	125	Башлакова А.Л.	173
Keller John.....	223	Бей М.П.....	74
Kreivaitis R.	148	Белоцерковский М.А.....	130
Kupčinskas A.	148	Белясова Н.А.	221, 224
Laikhtman Alex.....	126	Бильдюкевич А.В.....	98
Mäder E.	193	Бирюков В.П.....	111, 165
Michailov V.....	127	Бобович Е.В.....	92, 93
Padgurskas J.	45, 127	Богданов А.Л.	138, 150
Rapoport Lev.....	126	Богданова В.В.....	75, 102
Reškevičius G.....	45	Богданович С.П.....	18, 104, 151
Rukuiža R.....	127	Богомолов Л.М.....	44
Sezen Meltem.....	126	Бойко А.А.	90
Tolstopyatov E.M.....	178	Бойко В.В.....	117
Venckevičius G.	148	Бойко М.В.....	43, 140
Wetzel Bernd.....	32	Бойко Т.Г.	140
Yu C.C.....	33	Болотов А.Н.....	47
Zhandarov S.F.....	193, 194	Большаков А.Н.....	139
Žunda A.....	127	Бордубанова Е.Ю.....	129
Аборкин А.В.	81, 134	Борисенко М.В.....	215
Агабеков В.Е.....	79, 135, 222	Борисова Р.В.....	100
Адериха В.Н.....	18, 174	Борозна В.Д.	14, 106
Акименко С.С.....	177	Бохан Ю.И.	82, 83
Албагачиев А.Ю.....	38	Брыкова А.Н.....	121
Алексеев А.Г.....	172	Букарев И.М.....	132, 152
Алиева А.М.....	114	Булгаревич С.Б.....	43
Алимирзоева Н.А.....	30	Буркин А.Н.....	14, 106
Аль-Абси Р.А.....	207	Бурлов А.С.....	140
Анисимов А.А.....	168	Бурмистр М.В.....	20
Анисимов В.Н.....	20	Бурченков К.С.....	136
Анисович А.Г.....	17	Буря А.И.	19, 21
Антонова Н.	220	Бутовская Г.В.....	72, 112, 113
Антусёва А.В.....	78	Бухаров С.Н.....	84, 128
Арзуманова Н.Б.....	11	Буяев Д.И.....	169
Аскадский А.А.....	9	Буяновский И.А.....	139

Валенков А.М.	22, 69	Давыдова О.В.	90
Валенчиц Г.П.	104	Данилова-Третьяк С.М.	25
Варнава А.А.	82, 83	Демидов Г.А.	205
Вархолински Б.	41	Джавадов М.Я.	131
Василевич Ю.В.	23, 201	Джанахмедов А.Х.	131
Василенко В.В.	66	Джанг Сянь Хун.	160
Васильев А.П.	172	Джафаров В.А.	110
Васильев П.В.	104	Джафаров Р.В.	115
Васильев С.В.	158	Диденко А.Л.	204
Васильева А.С.	192	Дмитриев Н.Н.	42
Васильева В.С.	28	Дмитриева Т.В.	117
Винидиктова Н.С.	85, 86, 94	Дмитриченко Е.Э.	154
Вишневский К.В.	24	Дмитриченко Н.Ф.	59
Волков И.О.	168	Дмитрович А.А.	141
Волнянко Е.Н.	149	Добыш В.А.	113, 221
Воробьева Е.В.	95	Долинская Р.М.	91
Высочинская Ю.С.	168	Дробышевская Н.Е.	90
Гавриленко С.Л.	200, 205	Дубкова В.И.	224
Гаврюшенко Н.С.	163, 168	Дубровский В.В.	15, 18
Гайшун В.Е.	119	Дударева О.А.	210
Галась В.Ю.	145	Дудченко И.П.	44
Галкина А.Г.	140	Евдокименко Н.М.	20
Гармони́на А.Н.	65	Евсеева Л.Е.	25
Гвоздев А.А.	171	Егоренков Н.И.	213
Герасименко С.А.	87	Елкин А.И.	81
Гилевич А.	41	Еремин А.Н.	105, 116
Гилевская К.С.	212	Ермаков С.Ф.	150
Глазунова А.А.	46	Ермаков С.Ф.	138, 218
Глазырин Н.П.	182	Ермолинский А.В.	72
Гоголева О.В.	206	Ермолкевич И.В.	198
Голубева Е.А.	207	Ермолович О.А.	86, 94
Гольдаде В.А.	14, 106	Ерохин Д.В.	181
Горелый К.А.	201	Жарин А.Л.	53
Горошков М.В.	9, 39, 168	Жарская Т.А.	93
Горюнова А.К.	166	Жорник В.И.	155
Горячева И.Г.	4, 39, 202	Жук И.Г.	183
Гракович П.Н.	172, 175, 183, 188	Загорский Д.Л.	164
Грачева Е.А.	79	Займовская Т.А.	129
Грачек В.И.	88	Зайцева Е.И.	192
Григорчик А.Н.	130	Залеснов А.И.	132, 152
Григорьев А.Я.	153, 154	Запольский А.В.	155
Гринюк Е.В.	73, 112	Захаров С.М.	39
Гришина И.П.	210	Зернин М.В.	199
Гулвердашвили Ц.Д.	114	Злотников И.И.	22
Гулиев А.М.	115, 227	Золотая П.С.	142
Гулиев К.Г.	114, 115	Зотов С.В.	14, 106
Гулиева А.Ф.	110	Зубарь Т.И.	29, 40, 41, 52, 144, 184, 204
Гулиева Ф.С.	30	Иванов Л.Ф.	154, 176
Гунько В.М.	103	Иванова Н.А.	105, 116
Гут М.М.	179, 180	Ивахник А.В.	155
Гуцев Д.М.	154, 186	Ивахник В.П.	155
Давыдов А.А.	89	Измайлов В.В.	60

Исакович О.И.	88	Круль Л.П.	72, 73, 112
Искандарова Д.О.	143	Крутько Э.Т.	92, 93
Каграманов Н.Д.	169	Ксенофонтов М.А.	28
Кадолич Ж.В.	225	Кудина Е.Ф.	78, 86, 92, 94
Казак А.В.	х, 171	Кудло В.В.	183
Казанкин В.А.	63	Кудрицкий В.Г.	186
Казанкина Е.Н.	63	Кузей А.М.	51
Казьмин А.А.	68	Кузин В.В.	61, 62
Калинин Л.А.	108, 182	Кузнецова Т.А.	29, 40, 41, 52, 144, 184, 204
Калиниченко А.С.	46	Кузьменков Д.С.	207
Каменев П.А.	44	Кузьминский Ю.Г.	215, 216
Капитонова Ю.В.	209	Кузьмицкий А.М.	167
Караваева А.В.	224	Кукареко В.А.	130
Карапетян А.Н.	48, 156	Кулиев А.М.	30
Карпенко К.И.	147	Куликович Д.Б.	85
Карсим Л.О.	117	Куликовская В.И.	214, 221, 222
Кахраманов Н.Т.	11, 26	Кулиш Н.П.	219
Каюшников С.Н.	27, 104	Кумар Н.	170
Квасов Н.Т.	29	Купреев А.В.	202
Кимленко И.М.	119	Курбанова Н.И.	30
Клабукова Л.Ф.	169	Курбанова Р.В.	26
Клименко С.А.	12, 80	Курочка К.С.	203
Климовцова И.А.	112	Кускильдина Ю.Р.	78
Клубович В.В.	68	Лавров И.В.	195
Клюев А.Ю.	76	Лагунова Е.О.	57, 66
Князькина И.В.	133	Ладутько Е.И.	212
Ковалёва И.Н.	153	Лазарева Н.Н.	209
Коваль В.Н.	13, 15	Лапицкая В.А.	29, 41, 52, 204
Коваль И.В.	186	Лапшина Е.М.	95
Коврига В.В.	133, 190, 191, 192	Ларикова С.Н.	79
Кожевникова Г.В.	49	Ласковенко Н.Н.	96
Кожушко В.В.	197	Ласковнев А.П.	167
Козаков А.Т.	170	Латышев И.А.	76
Козинец М.В.	х, 171	Лебедев Е.В.	96
Козлов Н.Г.	76	Лебедева Е.В.	197
Колбая В.Г.	191	Леванцевич М.А.	46
Колесников В.И.	50, 146, 170, 195	Левин М.Л.	196
Колмаков А.Г.	12, 80	Левченко В.А.	139
Комаров А.И.	142, 143, 144	Лейзеронек Г.Н.	104
Комарова В.И.	142, 143, 144	Лемехов В.В.	158
Конакова О.В.	95	Лемехов Ю.В.	158
Константинова Е.Э.	220	Леонов А.Ю.	67
Корнев Ю.В.	34	Лешкевич А.В.	97
Косенок Я.А.	119	Лешок А.В.	141
Краморева Л.И.	85	Ливонович К.С.	226
Красковский А.Н.	214, 221	Лин Д.Г.	95
Краснов А.П.	9, 39, 163, 168, 169	Лисицын Р.Ю.	136
Красноручкая Н.С.	205	Лихтерова Н.М.	166
Кривогуз Ю.М.	71	Логвиненко П.Н.	117
Крижевский И.М.	157	Лозовская М.Э.	222
Кропотин О.В.	177, 200	Луцко В.Ф.	68
Кротова О.А.	92	Лысенко Г.Н.	76

Любимова Е.С.	98	Новиков В.В.	47, 136, 137
Любичева А.Н.	34	Новиков Е.С.	146
Лядов А.С.	129	Новикова О.О.	47
Лясникова А.В.	210	Новоселова М.В.	60
Ляховецкий М.А.	34	Носов К.С.	107
Маевская О.И.	224	Овчинников К.В.	106, 225
Майба И.А.	147	Овчинникова Т.Ф.	225
Макаренко А.В.	185	Оганесова Э.Ю.	129
Макаренко В.М.	176	Оганесян К.В.	48, 156
Макаренко О.А.	71	Ольховик В.К.	70
Макаров М.М.	209	Орда Д.В.	143
Маленко П.И.	67	Орлов С.В.	217
Мамаев О.И.	73	Осенин Ю.И.	35
Мамедли С.Б.	115	Осенин Ю.Ю.	35
Мардосевич Е.И.	46	Островская Л.Е.	28
Маркелова О.А.	210	Осыко И.Д.	120
Марцынкевич Р.В.	88	Охлопкова А.А.	100, 172
Маршалов М.С.	136	Охлопкова Т.А.	100
Матлин М.М.	63	Паентко В.В.	103
Матрунчик Ю.В.	103	Панарин Е.Ф.	224
Машков Ю.К.	177, 200	Панова М.О.	169
Мезрин А.М.	158, 161, 164	Пантелеев И.А.	44
Меликсетян Н.Г.	159	Пантелеев К.В.	53
Мельникова Г.Б.	98, 220	Пантюхов О.Е.	107
Меринов В.К.	128	Паньков В.В.	226
Мигаль Ю.Ф.	146, 147	Паренаго О.П.	129
Микитевич В.А.	53	Пашаев А.М.	131
Микулич В.С.	74	Перепелица Ф.А.	205
Миланенко А.А.	59	Песецкий С.С.	8, 18, 104
Митюрин Г.С.	197	Петлицкая Т.В.	122
Михневич А.С.	99	Петрова Е.С.	85
Мишин И.В.	99	Петроковец Е.М.	42
Можаровский В.В.	207	Петухова Е.С.	188
Мозгунова А.И.	63	Печерский Г.Г.	78
Мукутадзе А.М.	64	Пилипцов Д.Г.	160
Мукутадзе М.А.	65, 66	Плескачевский Ю.М.	7
Муравский Ал.А.	74	Плиско Т.В.	98
Муравский Ан.А.	74	Подденежный Е.Н.	90
Муравьева Т.И.	158, 164	Поликарпов А.П.	88
Мышкин Н.К.	4, 202	Полилов А.Н.	208
Набережная О.А.	21	Полховский М.В.	175
Назарович А.Н.	102	Пономаренко А.Г.	140
Наумкин А.В.	9, 163, 168	Попова М.А.	145
Наумов А.Г.	137	Попова О.С.	68
Невмержицкая Г.Ф.	117	Прищепенко Д.В.	101
Неумержицкая Е.Ю.	23	Прожега М.В.	38
Никифоров Л.А.	100	Прокопчук Н.Р.	24, 27, 76, 91, 101
Никогосов М.В.	140	Прокопьев Н.В.	192
Николаев В.И.	218	Радюк А.Н.	106
Николаева К.В.	25	Рамазанов Г.А.	227
Новик Г.И.	212	Рева О.В.	102
Новик Х.А.	116	Резникова Л.Г.	72

Релмасира К.Д.	67	Соломянский А.Е.	135
Ремез О.С.	103	Солоп К.С.	57, 58
Рзаев Р.М.	115	Солоп С.А.	58
Рогачев А.А.	118, 184	Солтанмурадов П. Р.	70
Рогачев А.В.	118, 160	Соснов И.И.	35
Роговой А.Н.	141	Спиридонов А.М.	100
Рожкова Н.Н.	х, 142, 171	Станкевич В.М.	151
Романович С.И.	198	Стародубцев И.Е.	213
Рубаник В.В.	68	Стародубцева М.Н.	213
Руденков А.С.	160	Старцев В.А.	217
Рыбкин Н.Н.	199	Степанов Ф.И.	202
Рябкова В.В.	132	Стерехов О.С.	54
Рябов С.В.	117	Столотнюк С.В.	158
Рябченко Т.В.	198, 199	Строгонова С.С.	13
Савельев Ю.В.	121	Стручкова Т.С.	172
Савицкая Т.А.	119	Суханова Т.Е.	204
Савицкий А.И.	85	Сырбу Светлана А.	136, 137
Савчук А.Н.	59	Сычев А.А.	195
Сагайдак Д.И.	216	Сычев А.П.	50, 195
Садыгова А.И.	114	Тагиев Д.Б.	114
Саид-Галиев Э.Е.	163	Танаева С.А.	25
Салазкин С.Н.	9	Таран В.М.	210
Сароян В.В.	48, 156	Тарасевич В.А.	113, 221
Сарычев А.А.	175	Татаркин Д.Ю.	165
Сахоненко А.В.	201	Татусь Н.А.	208
Сахоненко С.В.	201	Тимофеев И.А.	217
Сачек Б.Я.	158, 161, 164	Тимошенко А.В.	138
Свириденко А.И.	4	Тимошенко В.В.	69, 107
Свистун А.И.	53	Тихонов М.М.	75
Селькин В.П.	54, 185	Толстая Т.Н.	220
Сементовская А.А.	211	Толстопятов Е.М.	179
Сенатрев А.Н.	128	Торская Е.В.	34, 55, 202
Сергиенко В.П.	128, 162	Травинская Т.В.	121
Сергиенко О.В.	35	Трубенко Д.Н.	203
Сердюков А.Н.	197	Тувшинтур П.	219
Сидашов А.В.	170	Тулейко А.С.	84, 162
Сизарёв В.Д.	158	Турица Ю.А.	59
Силантьева О.А.	42	Тычинская Л.Ю.	72
Симонюк И.Ю.	162	Тютюма В.Д.	36
Синёв И.В.	120	Углов В.В.	29, 167
Скаковский Е.Д.	72	Усов П.П.	56
Слепцова С.А.	209	Усова В.Н.	104
Смирнов А.В.	120	Усольцева Н.В.	х, 171
Смирнов Н.И.	37, 38	Усс Е.П.	27
Смирнов Н.Н.	38	Ухарцева И.Ю.	225
Смирнова А.И.	х, 171	Ушеренко С.М.	122
Смирнова Ю.Н.	169	Ушеренко Ю.С.	122
Собольков А.В.	152	Федоренко А.А.	113
Соколова Н.М.	106	Федоров Л.Ю.	16
Солдатенков И.А.	158	Федоров С.Ю.	61, 62
Соловский М.В.	224	Федосеева В.И.	209
Соловьёва В.А.	163	Федосенко Н.Н.	160

Филатова О.С.	219	Шаповалов В.М.	22, 90, 106, 107
Филиппович Л.Н.	105, 116	Шапошникова В.В.	9
Фишков А.А.	111, 165	Шаталов К.В.	166
Фомина Е.К.	73	Шахаб С.Н.	105, 116
Ханбабаева Г.Д.	110	Шахназарли Р.З.	227
Хатько В.В.	77	Шашок Ж.С.	97, 101
Хейфец М.Л.	12, 80	Шевлик Н.В.	13
Хоружик С.А.	226	Шевченко В.В.	8, 15
Хренов Д.С.	81	Шелестова В.А.	175, 187
Хриптович Е.В.	165	Шестовский Д.В.	123
Худoley А.Л.	196	Шилагарди Г.	219
Цветкова Е.А.	225	Шилько И.С.	181, 206
Целуев М.Ю.	186, 187	Шилько С.В.	198, 199, 200
Цыдик И.С.	183	Шиманский В.И.	29, 167
Чапланова Ж.Д.	79	Ширяева Т.А.	140
Чаплыгин С.А.	60	Шпилевский Э.М.	219
Чемисенко О.В.	177	Шумская В.Ю.	108
Черенда Н.Н.	167	Шункевич А.А.	88
Черников Д.А.	192	Шутова Т.Г.	226
Черноус Д.А.	77	Щеголихина О.И.	168
Чесноков А.В.	35, 217	Щербакова О.О.	164
Чижик С.А. 29, 40, 41, 52, 144, 184, 204, 220		Щербина Л.А.	13
Чмыхова Т.Г.	138	Яговкина А.Н.	37
Шакиров А.В.	134	Яковлев В.Б.	195
Шалобаев Е.В.	205	Яковлева А.С.	74
Шаповалов А.В.	176	Ярмоленко М.А.	109, 118
Шаповалов В.А.	174	Яценко В.С.	70

Электронное
научное издание

**Международная научно-техническая конференция
«ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ»
(ПОЛИКОМТРИБ–2017)**

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) 77 52 12;

Факс: +375 (232) 77 52 11

mpri@mail.ru

<http://mpri.org.by>