

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-2019)

Гомель • Беларусь
25—28 июня 2019 г.
Тезисы докладов



ГОМЕЛЬ • 2019

УДК 620.22-419:678.01-621.891

ПОЛИКОМТРИБ-2019: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2019. — 280 с.

ISBN 978-985-6477-52-5

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. Адериha, 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. Толстомятов, В.А. Шелестова, С.В. Шилько, В.М. Шаповалов

Подписано в печать 20.06.2019. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 70 экз. Заказ № 07-19

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., 2019

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	i
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	3
“Tribological Health Care” — the Austrian Model of an Excellence Centre for Tribology and Its Orientation Towards the Specialized Basic-Oriented Industrial Research	5
F. Franek.....	5
Green Tribology — Demands, Problems, Solutions	6
J. Padgurskas, D. Volskis, M. Rukanskis.....	6
Особенности фрикционного взаимодействия в электрических полях металлополимерных пар трения	7
А.М. Пашаев, А.Х. Джанахмедов, М.Я. Джавадов	7
Проблемы получения биоразлагаемых пластичных смазок.....	8
О.П. Паренего	8
Антифрикционные дисперсно-наполненные полимерные композиты: многоуровневый мезомеханический анализ, экспериментальное изучение, технологии получения	9
С.В. Панин, С.В. Шилько, Ю.М. Плескачевский	9
Функционализированные сополимеры олефинов и смеси полиолефинов, их применение в технологии многофункциональных композитов	10
Ю.М. Кривогуз, С.С. Песецкий	10
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	11
Секция 1 Структура и свойства композиционных материалов	11
Устные доклады	13
Радиационно-химический синтез полиакриловой кислоты для использования в качестве модификатора ультрафильтрационных полимерных мембран.....	13
Л.П. Круль, Е.А. Назаров, Р.Л. Свердлов, Л.Г. Резникова, М.В. Ласминская, Е.В. Гринюк	13
Нанокompозиты на основе функционализированного полиэтилена высокой плотности и аппретированного бентонита	14
Н.Т. Кахраманов, Р.В. Курбанова	14
Лазерная абляция радиолизованного политетрафторэтилена.....	15
Е.М. Толстомятов, С.Р. Аллаяров	15
Оптические свойства поливинилспиртовых пленок, содержащих дихроичные красители и композит полианилин/серебро	16
Л.Н. Филиппович, Ж.В. Игнатович, Х.А. Новик, С.Н. Шахаб	16
Модифицированные терпеноидномалеиновые аддукты — перспективные отвердители эпоксидных смол.....	17
И.А. Латышевич, Е.И. Гапанькова, А.Ю. Ключев, Н.Г. Козлов	17
Synergy Effects in Hybrid MWCNT/MnFe₂O₄/Epoxy Resin Composites	18
D. Meisak, J. Macutkevici, J. Banys, P. Kuzhir	18
Electromagnetic Properties of Composites with Onion-Like Carbon	19
J. Macutkevici, J. Banys, S. Moseenkov, V. Kuznetsov, O. Shenderova.....	19

Закрепление неорганических антипиренов на полиэфирных волокнах посредством ацетоновых зольей SnCl_2	20
О.В. Рева, А.Н. Назарович, Д.В. Криваль	20
Химическая активация поверхности полиамидных волокон перед огнезащитной обработкой	21
О.В. Рева, Д.В. Криваль	21
Модификация полимеров фуллеренами и их комплексами с металлами	22
Э.М. Шпилевский, О.С. Филатова, Г. Шилагарди, Д. Улам-Оргих	22
Non-Contact Diagnostics of Elastic Moduli in Metallic Composites	23
V.V. Kozhushko, V.P. Sergienko	23
Структура и свойства гибридных нанокомпозитов на основе полиэтилентерефталата, наполненного коротким стекловолокном и нанографитом	24
В.В. Дубровский, В.Н. Адериha, В.А. Шаповалов, С.С. Песецкий	24
Синтез и свойства полиэтилентерефталатгликоля	25
С.С. Строгонова, Н.В. Шевлик, С.С. Песецкий, Л.А. Щербина	25
структурная морфология, реологические и механические свойства термопластичных смесей на основе полиэтилентерефталатгликоля	26
В.Н. Коваль, С.С. Строгонова, С.С. Песецкий	26
Функционализация в расплаве полибутена, сополимера этилена и высших олефинов и их смесей ..	27
Ю.М. Кривогуз, О.А. Макаренко, А.М. Гулиев	27
Стендовые доклады	28
Controlling the Morphology of Organic Film by Varying End Groups of the Chromophore	28
L. Ivanov, K. Grytsenko, P. Lytvyn, Yu. Slominskii, V. Ksianzou, S. Schrader	28
Влияние топографии скользящей поверхности лыж на эффективность скольжения	29
А.Л. Богданов, В.Г. Кудрицкий	29
Влияние лазерного облучения на электреты заряд полиэтиленовых пленок	30
В.А. Гольдаде, М.А. Коваленко	30
Влияние термоокислительного старения на трекинговость самозатухающего ПАБ	31
А.А. Давыдов	31
Особенности электрической поляризации в модифицированных пневмоэкструзионных волокнах ..	32
С.В. Зотов, В.А. Гольдаде, Н.С. Винидиктова, В.И. Жукалов, А.Г. Кравцов, Ж.В. Кадолич	32
Свойства нанокомпозитов на основе везувиана и сополимеров этилена с гексеном	33
Н.Т. Кахраманов, И.В. Байрамова	33
Фронтальная сополимеризация акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфонатом натрия при различных направлениях движения фронта	34
Ю.В. Василевская, Е.О. Соломевич, Е.В. Гринюк, Л.П. Круль	34
Межмолекулярные взаимодействия полиуретановых макромолекул с солями 3-D металлов	35
Е.Ю. Бобкова, В.С. Васильева, М.А. Ксенофонов, Л.Е. Островская, В.В. Понарядов, М.Б. Шундалов	35
Анализ изменения параметров распределения потенциала поверхности полиамида-6 при воздействии УФ излучением	36
К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.Л. Жарин	36
Влияние электронного облучения на структуру и свойства полимеров	37
Б.К. Рахадиллов, Ж.Б. Сагдолдина, Д.Б. Буйткенов, О.А. Степанова	37
Влияние гибридного наполнения и температуры на воздухопроницаемость гермослоев шин	38
В.Н. Усова, С.И. Каюшников, А.Ю. Люштык, Г.Н. Лейзерон, С.П. Богданович, С.С. Песецкий	38

Структура и свойства нанокомпозитов ПА6/органоглина, получаемых компаундированием в расплаве	39
В.Н. Усова, Ю.С. Кузнецова, С.П. Богданович	39
Preparation of Layer-by-Layer Coated MOF Powder.....	40
T.G. Shutava, V.V. Pankov, C. Jansen, C. Janiak	40
Заочные доклады.....	41
Биоцидные композиции на основе стабилизированного ПВХ.....	41
Э.Н. Ахмедов, Т.Д. Гулиев, Г.А. Рамазанов, А.М. Гулиев	41
Исследование свойств нового хелатного ионита ФИБАН ХС-1	42
В.И. Грачек, А.П. Поликарпов, А.А. Шункевич, О.И. Исакович	42
Синтез и полимеризация феноксикарбонил п-циклопропилстирола.....	43
К.Г. Гулиев, А.И. Садыгова, Ц.Д. Гулвердашвили, Д.Б. Тагиев	42
Получение и исследование свойств олигогидроксиафтиленов и их композиций с термопластами	44
Р.Р. Гулиев, Д.Н. Алиева, Р.А. Ахмедова, Б.А. Мамедов	44
Металлсодержащие нанокомпозиты на основе эпоксидиановой смолы	45
Н.И. Курбанова, С.К. Рагимова, Н.Я. Ищенко, А.Т. Алыев, А.М. Кулиев	45
Оптически прозрачный полимер на основе 2-карбоксипарацклопропилстирола и акрилонитрила	46
С.Б. Мамедли, Р.В. Джафаров	46
Структура и свойства наноструктурированных пленок поливинилкарбазола с наночастицами диоксида кремния	47
В.М. Акулова, Г.Б. Мельникова, А.Д. Замковец, С.А. Чижик	47
Синтез и изучение свойств пара-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)бензола и исследование его в составе ПВХ-композиции.....	48
Х.Г. Назаралиев, С.Д. Гаджиева, М.А. Абдурахманова, А.Г. Алиева.....	48
Набухание сшитого сополимера акриламида и акрилата натрия в водных растворах солей меди (II) с добавками аминокислот.....	49
Д.Л. Кудрявский, Е.К. Фомина, О.В. Якименко, Е.В. Гринюк, М.В. Ласминская	49
Макромолекулярные смешанные комплексы меди (II) с сополимером акриламида и акрилата натрия и аминокислотами	50
Е.К. Фомина, Д.Л. Кудрявский, Г.В. Бутовская, Л.Ю. Тычинская, Е.Д. Скаковский, Р.Л. Свердлов.....	50
Негативные фоторезисты на основе сополимеров 2-глицидилоксикарбонил 1-п(винил-фенил)циклопропана с 2,3-диметилбутадиеном-1,3	51
К.Г. Гулиев, У.А. Хамедова, Р.В. Джафаров, Р.М. Рзаев.....	51
Полимерные пленочные композиции на основе хитозана и карбоновых кислот с дезинфицирующим эффектом	52
В.О. Шабловский, А.В. Тучковская, И.А. Климовцова, В.А. Рухля, О.Г. Пап	52
Исследование реакционной способности алкидного олигомера в реакции сополимеризации со стиролом	53
Е.И. Яблонская, Н.Р. Прокопчук.....	53
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	55
Секция 2 Трибология	55
Устные доклады	57
Statistical Approaches to Contact between Rough Elastic Solids.....	57
F.M. Borodich and A. Pepelyshev.....	57

Расчетно-экспериментальная оценка параметров взаимодействия, повреждения и разрушения поверхностей подшипников скольжения	58
М.В. Зернин	58
Adhesive Contact Problems for a thin Elastic Layer: Asymptotic Analysis and Evaluation of Properties	59
N.V. Perepelkin, F.M. Borodich.....	59
Склерометрические показатели и акустико-эмиссионная активность стали при реверсивном трении.....	60
В.В. Шевеля, Г.С. Калда, Ю.С. Соколан	60
Распределение давления в зазоре между вращающимися цилиндрами	61
В.Д. Тютюма.....	61
Влияние марки и размера графитсодержащей добавки на триботехнические свойства порошкового фрикционного материала на основе меди, работающего в условиях граничного трения	62
А.Ф. Ильющенко, А.Н. Роговой, А.В. Лешок, Н.А. Алексеенко.....	62
О современной теории и технике управления автоматическими трансмиссиями мобильных машин с фрикционными элементами управления	63
Л.Г. Красневский	63
Динамика и статика твердых тел на плоскости с анизотропным трением	64
Н.Н. Дмитриев, Е.М. Петроковец.....	64
Диссипативный маятниковый адгезиометр на одном шарике.....	65
И.З. Джилавдари, С. Мекид, Н.Н. Ризноокая	65
Определение и визуализация составляющих коэффициента трения эластичных антифрикционных материалов.....	66
М.А. Гетикова, А.Н. Попов, И.С. Шилько	66
Стендовые доклады	67
Surface Topography and Properties of Operated Slide Journal Micro-Bearing.....	67
O. Lupicka, I. Maciejewski, T.A. Kuznetsova, V.A. Lapitskaya	67
Механизм самоустановления сил трения при поперечной прокатке	68
Г.В. Кожевникова	68
Оптимизация процесса поперечной прокатки путем изменения контактного трения.....	69
Г.В. Кожевникова	69
Имитатор бортового трибометра для испытаний материалов космического назначения.....	70
В.Г. Кудрицкий, Д.М. Гуцев, А.Я. Григорьев.....	70
Параметрическая классификация типов масел по диаметру пятна контакта.....	71
В.В. Подгорная, Л.Н. Марченко, Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева.....	71
Статистическая оценка параметрической эквивалентности триботехнических испытаний смазочных материалов на основе растительных масел.....	72
В.В. Подгорная, Л.Н. Марченко, Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева.....	72
Заочные доклады	73
Основные характеристики трибоконтакта частицы и вязкоупругой поверхности эластомера при ударном нагружении	73
В.Г. Копченков	73
Вклад «антифрикционности» в разработанную концепцию связи химического строения и трибологических свойств термостойких термопластов	74
А.П. Краснов, А.В. Наумкин, М.В. Горошков, В.В. Шапошникова, С.Н. Салазкин.....	74

Клиновидные опоры скольжения, работающие на вязкоупругом смазочном материале, обусловленные расплавом	75
Е.О. Лагунова	75
Расчетная модель радиального подшипника скольжения с легкоплавким металлическим покрытием.....	76
К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, А.Н. Опацких, В.В. Василенко	76
Особенности расчета тормозных устройств гравитационных роликовых конвейеров для паллет	77
А.Л. Носко, Е.В. Сафронов	77
Исследования износостойкости шлифовальной ленты.....	78
Н.В. Сырейщикова, Д.Ю. Пименов	78
Определение ресурса подшипников качения с учетом режима трения	79
С.И. Платов, Д.В. Терентьев, В.В. Рубаник, М.А. Леванцевич	79
Фундаментальная трибохарактеристика радиального однорядного подшипника качения	80
П.Д. Чхетиани.....	80
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	81
Секция 3 Технологии и применение полимерных и композиционных материалов.....	81
Устные доклады	83
Создание полимерных нанокомпозитов триботехнического назначения	83
А.А. Охлопкова, С.А. Слепцова, Н.Н. Лазарева, Т.А. Охлопкова, Л.А. Никифоров, Р.В. Борисова.....	83
Пластическое разрушение в полиэтиленовых трубах с различными сроками эксплуатации	84
В.Г. Колбая, В.В. Коврига.....	84
Исследование особенностей сшивания ПЭ на вулканометрах и ротационном вискозиметре	85
В.В. Коврига	85
Исследование влияния электронного облучения на износостойкость полимерных материалов	86
Ж.Б. Сагдолдина, Б.Т. Туякбаев, А. Маулит, А.Б. Кенесбеков	86
Разработка и исследование полиэтиленовых электропроводящих композитов для топливных канистр	87
Е.С. Петухова, П.Н. Петрова, Э.В. Чикачев	87
Исследование физико-механических и триботехнических свойств ПТФЭ с комбинированными наполнителями	88
А.П. Васильев, Т.С. Стручкова, А.А. Охлопкова, А.Г. Алексеев, П.Н. Гракович, С.А. Слепцова	88
ИК-спектроскопические исследования поверхностей трения композитов на основе ПТФЭ	89
А.Л. Федоров, У.Р. Лугинова.....	89
Применение гелей на основе дисперсного гидросиликата натрия для увеличения нефтеотдачи	90
А.В. Антусёва, Е.Ф. Кудина	90
Мультислойные пленки привитых сополимеров хитозана, резистентные к адсорбции белков	91
Т.Г. Шутова, К.С. Ливонович	91
Новые биоразлагаемые материалы с антимикробными свойствами на основе поли-L-лактида.....	92
Г.В. Бутовская, А.А. Федоренко, Л.П. Круль, В.А. Тарасевич, В.А. Добыш, А.Г. Любимов, Н.А. Беясова	92
Оценка адгезионной прочности и параметров трения армирующей нити в армированной полимерной трубе.....	93
С.Ф. Жандаров, А.С. Васильева	93
Анионная полимеризация с раскрытием цикла гексафторпропиленоксида	94
С.В. Костюк, И.В. Василенко, F. Ganachaud	94

Пьезоупругий полимерный композит на основе анодного оксида алюминия	95
Д.А. Черноус	95
Получение сополимера стирола с малеиновым ангидридом в среде лесохимического растворителя.....	96
Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич, Н.Г. Козлов, А.Ю. Ключев	96
Качественный фазовый анализ композитов на основе фторопласта-4 с малой степенью наполнения углеродными волокнами.....	97
А.Л. Башлакова.....	97
Стендовые доклады	95
Применение полимерных композиционных материалов в колковых деталях рабочих органов хлопковых машин и механизмов.....	98
Н.С. Абед, Ш.О. Эминов, Г. Гулямов	98
Разработка научно-методических принципов технологии получения композиционных полимерных клеев	99
М.Г. Бабаханова, Г.А. Тухлиев, А.Ш. Насриддинов	99
Влияние параметров наполнителя композиционного материала на его демпфирующие свойства. 100	
А.А. Бойко, М.И. Михайлов, К.М. Михайлов	100
Разработка композиционных материалов на основе смесей полиолефинов и отходов нефтепереработки	101
Ж.Н. Громыко, Н.С. Винидиктова, К.В. Ефимчик, О.А. Ермолович	101
Перспективы разработок в области биоразлагаемых композитов	102
Н.С. Винидиктова, О.В. Конакова, В.М. Шаповалов	102
Исследование окислительной стойкости наполненного шунгитом полиэтилена при использовании антиоксидантов аминного и фенольного типов.....	103
Е.В. Воробьёва, Е.Н. Волнянко.....	103
Коробление деталей из материалов на основе ПЭВП, полученных по экструзионно-прессовой технологии	104
С.А. Герасименко	104
Биоразлагаемые композиты на основе полиамидов, наполненных льнокострой	105
О.В. Давыдова, Н.Е. Дробышевская, Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко, В.М. Шаповалов	105
Влияние декорирования многостенных углеродных нанотрубок наночастицами TiC на повреждаемость при обработке в планетарной мельнице	106
А.В. Аборкин, А.И. Елкин, К.С. Хорьков, Д.В. Бокарёв.....	106
Разработка мультигибридных силикаторганических наполнителей для полимерных композиционных материалов	107
И. И. Злотников, В. М. Шаповалов	107
Разработка технологии изготовления фильтрующих элементов для очистки жидкости и газов методом порошковой металлургии.....	108
М. Каршиев, А.М. Эминов	108
Исследование особенностей механического поведения сшитого ПЭ методом раздира раздирающим элементом.....	109
А.С. Васильева, В.В. Коврига	109
Применение модифицированных реактопластов в качестве покрытий.....	110
Е.Ф. Кудина	110
Применение фотоплетизмографии и модели гемодинамики для биомеханического мониторинга тренировочного процесса	111
Ю.Г. Кузьминский.....	111

Эффективный композиционный полимерный материал для стабилизации буровых растворов	112
К.С. Негматова, Ж.Н. Негматов	112
Разработка композиционных материалов для крашения волокон и тканей на их основе.....	113
М.Н. Негматова, Ш.Н. Расулова	113
Экспериментальные предпосылки использования жидкой формы хондроитин сульфата	114
В.И. Николаев, С.Ф. Ермаков, Д.А. Зиновкин	114
Получение композитов медь/серебро	115
Х.А. Новик, Ж.В. Игнатович, Л.Н. Филиппович	115
Композиционные материалы на основе смесей гидроксидов металлов и бентонитовых глин	116
К.В. Овчинников, Д.Л. Подобед, А.А. Давыдов, А.А. Тимофеев	116
Влияния длины волокон на механические характеристики композитов фторполимер + углеродное волокно	117
В.П. Селькин, А.С. Михневич, А.В. Упорова	117
Использование керамических инфракрасных излучателей при испытании материалов на растяжение	118
В.П. Селькин, О.С. Стерехов	118
Композиционные материалы на основе модифицированных вторичных термопластов для получения изделий строительного назначения	119
А.А. Тимофеев, Е.А. Шутова, В.П. Дубодел, О.Е. Пантюхов	119
Композиционные материалы на основе отходов полиуретанов	120
А.А. Тимофеев, А.Н. Радюк	120
Оценка звукопоглощения волокнисто-пористых материалов по сопротивлению продуванию воздушным потоком	121
А.С. Тулейко	121
Исследование вибропоглощающих свойств наполненных композиционных полимерных материалов.....	122
Т.У. Улмасов, О.Ш. Сабилова, А.Р. Сатторов	122
Исследование физико-механических свойств вибропоглощающих композиционных полимерных материалов.....	123
Т.У. Улмасов, С.С. Жовлиев, А.Р. Сатторов	123
Разработка композиционного материала на основе смеси полиолефинов и дисперсной древесины	124
А.В. Шаповалов, С.Ф. Мельников	124
Древеснополимерные композиты для получения изделий технического и бытового назначения ..	125
В.М. Шаповалов, С.Ф. Мельников, Р.С. Напеев, М.Л. Соловьев	125
Рециклинг полимеров	126
В.М. Шаповалов, С.Г. Кудян, В.И. Ткачев, З.Л. Тартаковский	126
Разработка мультигибридных силикаторганических наполнителей для полимерных композиционных материалов	127
И. И. Злотников, В. М. Шаповалов	127
Материаловедческие аспекты разработки облегченных сэндвичевых конструкций — компонентов изделий спортивного инвентаря	128
В.М. Шаповалов, С.В. Зотов, А.Я. Григорьев, А.П. Ласковнев	128
Влияние содержания углеродных волокон на термическое расширение фторопластовых композитов.....	129
В.А. Шелестова, И.В. Коваль, А.Л. Башлакова	129

Исследование методом РФЭС поверхности углеродных волокон после плазмохимической обработки	130
В.А. Шелестова, В.М. Макаренко, П.Н. Гракович	130
Перспективы применения антифрикционных ПТФЭ композитов армированных высокопрочными углеродными волокнами на основе полиакрилонитрила	131
И.С. Шилько	131
Влияние методов модифицирования полимерных волокнисто-пористых материалов на сорбционные свойства	132
В.Ю. Шумская, В.И. Жукалов	132
Функциональные волокнисто-пористые материалы для систем фильтрации	133
В.Ю. Шумская, Л.А. Калинин, Л.Ф. Иванов, В.В. Снежков	133
Физико-химические свойства композиционного полимерного материала, предотвращающего сальникообразование на долотах буровой колонны при бурении нефтегазовых скважин.....	134
Б.Ш. Эгамбердиев, К.С. Негматова, Ж.Н. Негматов	134
Базальтопластики — перспективные полимерные композиционные материалы конструкционного назначения.....	135
А.Х. Юсупбеков, С.С. Негматов	135
Заочные доклады	136
Оптимизация технологии переработки политрифторхлорэтилена.....	136
А.И. Буря, С.В. Калинин, Е.А. Ерёмин	136
Модификация бутадиенстирольного каучука новым реакционноспособным олигомером	137
К.В. Вишневский, А.В. Касперович, Э.Т. Крутько	137
Безэмульгаторная эмульсионная сополимеризация.....	138
А.И. Глоба, Е.О. Богдан, Ю.В. Духович, Н.А. Волощик	138
Криогели на основе композиции хитозан — поливиниловый спирт (ПВС): синтез и свойства.....	139
Е.В. Дихтярук, В.В. Паентко, А.К. Матковский, В.М. Гунько, Ю.Н. Ничипорук, А.Б. Котлярова	139
Совершенствование технологии получения отечественной L-молочной кислоты	140
И.А. Климовцова, И.П. Едимечева, Н.А. Головнева, Л.П. Круль	140
Защитно-стимулирующие композиции на основе поливинилацетата	141
И.А. Климовцова, В.О. Шабловский, А.В. Тучковская	141
Защитно-стимулирующие композиции на основе поливинилацетата	142
И.А. Климовцова, В.О. Шабловский, А.В. Тучковская	142
Создание и внедрение автоматизированных комплексов и технологических процессов производства ресурсосберегающих изделий из газонаполненных полимеров	143
М.А. Ксенофонтов, В.С. Васильева, С.В. Выдумчик, О.О. Гавриленко, Т.Г. Павлюкевич, С.А. Чупрынский	143
Металлсодержащие наночастицы в матрице малеинизированного полиэтилена	144
Н.И. Курбанова, Т.М. Гулиева, Н.Я. Ищенко, А.Т. Алыев, А.М. Кулиев	144
Климатическая стойкость пленок из порошковых красок.....	145
Т.Н. Кухта, Н.Р. Прокопчук	145
Термостойкая композиция на основе ароматического эпоксиполидиамидосульфоимида и соолигомера 1-нафтола с 1,4-диаминобензолом	146
Э.Т. Асланова, Ф.М. Мамедалиева, Б.А. Мамедов	146
Получение композитных микрочастиц куркумина различного состава методом распылительной сушки	147
Д. Л. Радюкевич, В.М. Акулова, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик, Нгуен Трон Тин, Нгуен Тан Бин	147

Фосфатидные концентраты, выделенные из растительных масел ультразвуковым структурированием. современные аспекты применения.....	148
И.С. Михаловский, Н.П. Матвейко, В.Н. Бабодей, А.В. Пчельникова	148
Полимерные материалы, обладающие биологической активностью. создание и перспективы использования.....	149
Ю.В. Савельев, Т.В. Травинская, А.Н. Брыкова, А.Н. Гончар, Л.А. Марковская, Л.П. Робота	149
Сравнительная кавитационно-эрозионная износостойкость фторопластов.....	150
М.С. Стечишин, В.П. Олександренко, А.В. Мартынюк.....	150
Модифицирование бутадиен-стирольного каучука путем его дихлорциклопропанирования	151
Р.З. Шахназарли, Н.Я. Ищенко, А.М. Гулиев.....	151
Функционализация полипропилена глицидиловым эфиром аллилового спирта для применения в минералонаполненных композитах	152
Р.З. Шахназарли, Н.Я. Ищенко, А.М. Гулиев, О.А. Макаренко.....	152
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	153
Секция 4 Трибоматериаловедение.....	153
Устные доклады	155
Физические основы создания самосмазывающихся керамических композитов	155
В.В. Алисин, М.Н. Рошин.....	155
Антифрикционные свойства алмазоподобного покрытия с подслоем AlTiN в ПАО-4.....	156
В.Д. Самусенко, И.А. Буяновский, В.А. Левченко, В.Н. Матвеев.....	156
Исследование триботехнических характеристик сопряжения «поддон-напольное покрытие»	157
Б. Я. Сачек, А. М. Мезрин, И. Ю. Цуканов.....	157
Investigation of Tannic Acid Effects, on CVD and PVD Coatings	158
D. Kazlauskas, V. Jankauskas, M. Gumbytė, M. Lelis.....	158
Оценка влияния углеродных нанотрубок на износостойкость морозостойкой резины	159
А.В. Морозов.....	159
Антифрикционные органопластики на основе тканого армирующего наполнителя для самосмазывающихся узлов трения скольжения.....	160
Г.С. Кулагина, Г.Ф. Железина	160
Влияние ZrC-, ZrC/Ni-ДНА-покрытий на износ лезвий ножей дереворежущего фрезерного инструмента	161
В.В. Чаевский, В.В. Жилинский, А.К. Кулешов, П.В. Рудак, Štefan Barčík, Peter Koleda	161
Эффективность антифрикционных твердосмазочных покрытий MODENGY™ на примере клапанов ТЭС	162
М.И. Прудников.....	162
К вопросу о причинах повышенной износостойкости высокоэнтропийных сплавов	163
Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников	163
Исследование покрытий из дисульфида молибдена в вакууме при повышенной температуре	164
Н.И. Смирнов, М.В. Прожега, Н.Н. Смирнов, С.Э. Хомяков, А.В. Чебурова, А.И. Беликов, В.В. Балков, А.Я. Бобкова	164
Исследование гидроабразивного изнашивания покрытия на основе никеля.....	165
М.В. Прожега, А.Ю. Иванников, А.В. Новиков, И.В. Опарин, А.Н. Назаров	165
Исследование ресурса и смазочных свойств пластичных смазочных материалов для подшипников качения	166
М.В. Прожега, Н.И. Смирнов, Н.Н. Смирнов, М.Н. Зеленская, А.В. Новиков, И.В. Опарин, А.Н. Назаров.....	166

Влияние графитсодержащей добавки кокса литейного и шунгита на триботехнические свойства фрикционного материала на основе железа	167
А.В. Лешок, А.Н. Роговой, М.В. Лазарчик, И.В. Фомихина	167
Испытание на трение и изнашивание покрытий ZrN в условиях микроконтакта с использованием атомно-силовой микроскопии	168
Т.А. Кузнецова, В.А. Лапицкая, Б. Вархолински, А. Гилевич, С.А. Чижик.....	168
Трибохимические процессы и скорость изнашивания нанокompозитов ПТФЭ-аморфный диоксид кремния по стали.....	169
В.Н. Адериha, В.П. Новиков, В.А. Шаповалов.....	169
Хромуглеродные покрытия с различным типом нанокompозитной структуры, полученные магнетронным распылением, и их свойства	170
М.М. Хрущов	170
Легирование углеродных покрытий — ориентантов некоторыми элементами — резерв повышения смазочных свойств масел	171
И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко, В.А. Левченко	171
Воздействие ультразвуковой обработки смазочного масла на работу трибосопряжения с оценкой остаточных эффектов в масле	172
А.А. Симдянкин, И.А. Успенский, Н.В. Бышов, М.Н. Слюсарев.....	172
Трибологические свойства ряда пластичных смазочных материалов в композициях с углеродными наноструктурами различного строения	173
А.С. Парфенов, Е.В. Берёзина, А.И. Смирнова, А.А. Гвоздев, Т.П. Дьячкова, Н.Н. Рожкова, С.В. Савилов, Н.В. Усольцева.....	173
Исследование реологических свойств пластичных смазочных материалов с углеродными наноструктурами различного типа.....	174
М.А. Шилов, А.И. Смирнова, А.А. Гвоздев, Н.Н. Рожкова, Т.П. Дьячкова, А.А. Бурков, Н.В. Усольцева.....	174
Трансмиссионное масло для хвостового редуктора вертолета.....	175
И.В. Колесников, М.В. Бойко, А.П. Сычев.....	175
Исследование триботехнических характеристик фрикционных композитов для работы в среде смазочного материала с учетом шероховатости контртела	175
С.Н. Бухаров, А.Я. Григорьев, В.П. Сергиенко	176
Влияние полимерных наполнителей на характеристики комплексной кальциевой смазки	177
А.Л. Богданов.....	177
Триботехнические и эксплуатационные испытания растительных и минеральных смазочных материалов	178
Т.Г. Чмыхова, А.В. Тимошенко, С.Ф. Ермаков, Л.И. Коваль	178
Стендовые доклады	179
Tribological Properties of Metal Surfaces in Tribo-Pair, Deposited by Mo, Bronze and Ti-Al-C Alloy Using Electro-Spark Method.....	179
М. Rukanskis, J. Padgurskas.....	179
Новые температуростойкие углерод-углеродные материалы для космических аппаратов.....	180
В.В. Алисин, М.Н. Рошин	180
Механизм фрикционного взаимодействия в системе алмазосодержащий композиционный материал — сталь	181
В.Е. Бабич, А.М. Кузей.....	181
Эксплуатационные упругие свойства полимерных композитов фрикционного назначения.....	182
В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, И.В. Лавров, А.П. Сычев, А.А. Сычев, В.Б. Яковлев	182

Мониторинг минимальных зазоров между смазываемыми поверхностями трущихся сопряжений высокоскоростных динамически нагруженных систем	183
В.Л. Басинюк, Р.Е. Волкотруб, М.П. Лобкова, А.Е. Ковенский.....	183
Мониторинг и управление зазорами в аэростатических подшипниках скоростных электрошпинделей.....	184
В.Л. Басинюк, Р.Е. Волкотруб, А.Е. Ковенский, С.С. Папина	184
Оценка влияния углеродных нанотрубок на коэффициент трения морозостойкой резины	185
П.О. Буковский.....	185
Применение базовых типов присадок к смазочному материалу на основе рапсового масла	186
Ф.А. Григорьев	186
Влияние трибохимической активности на механизмы трения пары ШХ15 по Ni-P покрытию	187
Д.М. Гуцев, А.Я. Григорьев, А.П. Ласковнев	187
Микротвердость и фрикционные свойства газодинамических порошковых покрытий AMg6/C60+AlN.....	188
А.И. Елкин, В.В. Рябкова, А.Е. Паникин, А.В. Аборкин	188
Новый подход к получению биоразлагаемых пластичных смазок.....	189
В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник, Л.Ю.Тычинская	189
Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения для тяжелонагруженных узлов машин и механизмов	190
А.С. Кобец, О.С. Кабат, А.Д. Деркач, С.В. Зотов, К.В. Овчинников	190
Модель распределения тепла во фрикционном диске со спеченным фрикционным материалом при работе в условиях граничного трения.....	191
А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, Г.Ф. Громыко, Н.П. Мацука	191
Влияние химического состава покрытий Al-Cr-N на их механические и коррозионные свойства	192
А. Гилевич, Е. Добруховска, Д. Муржинский, Т.А. Кузнецова, Б. Вархолински	192
Определение трещиностойкости покрытия SiC.....	193
В.А. Лапицкая, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик, П.С. Гринчук, Д.А. Соловей.....	193
Влияние плазмы диэлектрического барьерного разряда на структуру и свойства пленок полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния	194
В.А. Лапицкая, Г.Б. Мельникова, Т.А. Кузнецова, А.Д. Замковец, С.А. Чижик, Д.А. Котов	194
Особенности контактного взаимодействия при тчении наплавов из кремнистой бронзы твердосплавными резцами	195
В.Я. Лебедев	195
Механизм изнашивания поликристалла алмаза при фрикционным контакте с металло-оксидным композиционным материалом.....	196
Ж.Е. Макарова, А.В. Францевич, Г.Г. Манукян	196
Исследование адгезионного взаимодействия шероховатых поверхностей.....	197
Ю.Ю. Маховская, И.Н. Ковалева	197
Использование явлений неравновесной термодинамики при разработке износостойких материалов.....	198
М.А. Мельник	198
Исследование влияния бронз разных марок на фрикционно-износные характеристики и твердость композитов для стационарного трения	199
В.К. Меринов, А.Н. Сенатрев, Т.А. Ахметов	199
Защита металлов от коррозии антикоррозионными полимерными покрытиями	200
С.У. Султанов, М.А. Бабаханова, К.С. Негматова.....	200

Определение коэффициента трения наноструктурированных пленок тантала и его соединений методом атомно-силовой микроскопии	201
А.С. Петровская, Г.Б. Мельникова, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик, А.В. Зыкова, В.И. Сафонов.....	201
Формирование защитного слоя на поверхности трения композитов ПТФЭ/слоистый силикат	202
С.А. Слепцова, С. Лаукканен, А.А. Охлопкова, П.Н. Тарасова.....	202
Трибологические свойства покрытий Mo-S-C, полученных СО-осаждением Mo и С из лазерной плазмы в сероводороде	203
В.Ю. Фоминский, А.А. Соловьев, Д.В. Фоминский, В.Н. Неволин, Р.И. Романов.....	203
Трибологические свойства композиционных монослоев Ленгмюра — Блоджетт бегеновой кислоты с наночастицами нитрида бора	204
А.Е. Соломянский, В.Е. Агабеков.....	204
Сравнительные исследования трибологических свойств твердосмазочных покрытий Mo/W//S/Se и алмазоподобного углерода.....	205
Д.В. Фоминский, В.Н. Неволин, В.Ю. Фоминский, Р.И. Романов, А.А. Соловьев.....	205
Поверхность трибоконтакта при металлполимерном трибосопряжении инкапсулируемых нанокмполитов	206
Ф.В. Мясников, К.И. Карпенко, Н.А. Мясникова, Е.С. Новиков.....	206
Антифрикционные материалы на основе ПТФЭ, содержащие силиконовое масло	207
А.Л. Федоров, М.А. Маркова.....	207
Применение лазерной сканирующей микроскопии для оценки топографии поверхностей трения.....	208
Т. Г. Федорова	208
Самоорганизация в процессах формировании поверхностей и эксплуатации изделий с покрытиями.....	209
М.Л. Хейфец, Н.М. Сенють, А.Г. Колмаков, С.А. Клименко	209
Метод управления характеристиками трения дискового тормоза подвижного состава	210
Ю.И. Осенин, О.В. Малахов, В.В. Малахова, А.В. Чесноков,.....	210
Влияние соотношения рабочих площадей тормозной колодки и тормозного диска дискового тормоза на уровень шума при торможении.....	211
Ю.И. Осенин, А.В. Чесноков, Ю.В. Кривошея, В.В. Бугаенко	211
Изучение изменений поверхностных слоев алюминиевых сплавов после трибологических испытаний.....	212
О.О. Щербакова, И.В. Шкалей, А.М. Мезрин.....	212
Исследование структуры стальных рельсов после различных условий эксплуатации методами микроскопии	213
Т.И. Муравьева, О.О. Щербакова	213
Влияние вязкоупругих граничных слоев на характеристики контактного взаимодействия.....	214
А.А. Яковенко, И.Г. Горячева, И.Н. Ковалева, А.Я. Григорьев	214
Заочные доклады	215
Износостойкость псевдосплавов на базе стали 95X18 и цветных металлов, напыленных методом высокоскоростной металлизации	215
Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик.....	215
К вопросу изнашивания самосмазывающихся наноповерхностей подшипников скольжения	216
В.И. Бахшалиев, А.А. Саламов, И.А. Исмаил	216
Исследование композиционного порошкового сплава с боридным упрочнением для получения коррозионно-износостойких защитных покрытий для оборудования нефтегазовой и урановой промышленности	217
А.А. Бекишева, Б.К. Кенжалиев, В.Г. Миронов, Г.Т. Шилов, Ж.Б. Ильмалиев	217

Получение антифрикционных покрытий на стали при лазерной наплавке	219
В.П. Бирюков, Э.Г. Гудушаури, Т.А. Базлова	219
Определение влияния режимов лазерной закалки на размеры упрочненных зон.....	220
В.П. Бирюков, В.В. Исаков, А.Ю. Федотов Д.А.Баулин.....	220
Влияние карбидного сплава на износостойкость ароматического полиамида фенилона C-2.....	221
А.И. Буря, А.-М.В. Томина, Е.Э. Литвинова, В.М. Гавриш	221
Исследование тепловых процессов в паре трения ролик-колодка на машинах трения типа «Амслер»	222
Г.В. Даровской, А.М. Елманов, М.Н. Езупова	222
Модельные представления о влиянии графеноподобного углерода на процесс микродугового окислирования	223
А.И. Комаров, П.С. Золотая, Н.И. Горбачук, Н.Н. Рожкова, В.П. Новиков.....	223
Исследование физико-механических и триботехнических свойств полимерных композитов на основе политетрафторэтилена, модифицированного вермикулитом.....	224
Н.Н. Лазарева, Д.Ю. Кириллина, С.А. Слепцова, Е.С. Афанасьева, А.А. Охлопкова	224
Антикоррозионные покрытия на основе эпоксиноволакефирного пленкообразователя и стеклянных чешуек	225
Л.В. Левиев, Н.Р. Прокопчук	225
Моделирование абразивного изнашивания модифицированной древесины	226
В.В. Макеев	226
Оценка характеристик гетерогенности диффузионных зон никотрированной стали 25Х3МЗНБЦА..	227
П.И. Маленко, А.Ю. Леонов, К.Д. Релмасира	227
Разрушение поверхностных слоев безасбестовых тормозных фрикционных материалов в условиях перехода от умеренного к интенсивному изнашивания	228
Н.Г. Меликсетян.....	228
Безасбестовый тормозной теплостойкий фрикционный композит с применением многокомпонентных материалов.....	229
Н.Г. Меликсетян, С.Г. Агбалян, Г.Н. Меликсетян	229
Магнитные смазочные масла на основе кремнийорганических наножидкостей.....	230
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова	230
Влияние химического строения фенолформальдегидного связующего на трение антифрикционных органоластов	231
М.О. Панова, А.П. Краснов, Е.А. Романченко, Л.Ф. Клубукова, В.А. Соловьева	231
Исследование влияния малеида Ф на триботехнические характеристики и теплостойкость ПТФЭ-композитов для узлов стационарного трения	232
А.Н. Сенатрев, В.К. Меринов, Т.А. Ахметов	232
Физико-химические свойства конструкционных сталей азотированных в автономном режиме	233
М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк, В.С. Курской, Ю.М. Билик	233
Влияние стеарата марганца на трибологические характеристики товарных трансмиссионных масел	234
В.В. Терентьев, И.А. Телегин, О.Б. Акопова	234
Исследование адгезионного взаимодействия двухслойного упругого полупространства	235
Е.В. Торская, И.Н. Ковалева	235
Модифицирование поверхностных слоев деталей лазерной обработкой.....	236
М.Н. Верещагин, М.Ю. Целуев, С.Н. Целуева.....	236
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	237
Секция 5 Механика полимерных композитов и моделирование.....	237

Устные доклады	239
Методы расчета износа и долговечности металлополимерных и полимерных зубчатых передач... 239 М.В. Чернец, В.Е. Старжинский.....	239
Метод оптимизации состава износостойких и конструкционных полимерных композитов на основе мезомеханического моделирования..... 240 С.В. Шилько	240
Seven Methods of Estimating the Interfacial Strength Parameters in a Pull-Out Test 241 S. Zhandarov, E. Mäder, U. Gohs	241
Реализация расчета напряжений и перемещений в трубе с податливой оболочкой и полиуретановой вязкоупругой теплоизоляцией 242 В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, Е.А. Голубева, Ю.В. Василевич	242
Разработка полиэтиленовых композиционных материалов стойких к различным климатическим воздействиям 243 Е.С. Петухова.....	243
Технология создания многокомпонентных металлополимерных структур методом ультразвуковой сварки..... 244 В.Ф.Луцко, В.В. Рубаник, В.С. Лабецкий, О.В. Кимстач, А.А. Казьмин, О.С. Попова	244
Анализ точности описания реологических свойств полимерных материалов в рамках вязкоупругой модели прони на основе статических и динамических испытаний 245 С.Л. Гавриленко, С.Н. Бухаров, О.В. Алексенко	245
Учет податливости в расчете параметров жидкостного трения в подшипнике скольжения 246 Н.Н. Рыбкин, Т.В. Рябченко, М.В. Зернин.....	246
Определение изгибной жесткости композитных лыж 247 С.В. Шилько, Т.В. Рябченко, Е.М. Петроковец, Д.А. Черноус, С.Н. Целуева	247
Методологические подходы к классификации типов эритроцитов при наследственном сфероцитозе на основе анализа АСМ-карт их поверхности 248 М.Н. Стародубцева, И.Е. Стародубцев, Ю.С. Харин, Е.Ф. Мицура, И.А. Челнокова, М.С. Абрамович, Н.И. Егоренков	248
Физико-химический анализ и мультифрактальная параметризация формирования наноструктурных материалов 249 П.А. Витязь , М.Л. Хейфец , В.Т. Сенють , А.Г. Колмаков , С.А. Клименко	249
Стендовые доклады	250
Поглотители микроволн на основе метаматериалов и металлополимерных слоев..... 250 И.В. Семченко, А.Л. Самофалов, В.А. Банный, Е.Н. Волнянко	250
Углеволоконистые композиционные имплантаты для устранения дефектов мягких и костных тканей 251 В.И. Дубкова, А.П. Малецкий, А.В. Глинник, Н.М. Бигун, О.И. Маевская.....	251
Модифицирование углеродных нанотрубок высшими карбоновыми кислотами: закономерности и эффекты 252 Т.П. Дьячкова, А.И. Кондаков, И.В. Гутник, А.Г. Ткачев, Н.В. Усольцева, А.И. Смирнова, С.Ю. Купреенко, М.А. Шилов	252
Заочные доклады	253
Механика релаксации напряжений в полимерных материалах..... 253 Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая, Д.А. Федотов.....	253
Оценка механических свойств полимеров по критерию Деборы..... 254 Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая, К.Г. Скворцов	254

Progressive Technology Resource and Energy Conservation at Manufacturing of Products from Recycled Materials	255
R.M. Dolinskaya, N.R. Prokopchuk.....	255
Математическое моделирование параметров для диагностики индентированием механических свойств деталей трибосистем	256
М.М. Матлин, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин, А.И. Мозгунова	256
Изучение деформационного поведения модифицированных гетероцепных полимеров	257
А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян, В.В. Сароян	257
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	258

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2019)

25—28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь

“TRIBOLOGICAL HEALTH CARE” — THE AUSTRIAN MODEL OF AN EXCELLENCE CENTRE FOR TRIBOLOGY AND ITS ORIENTATION TOWARDS THE SPECIALIZED BASIC-ORIENTED INDUSTRIAL RESEARCH

F. Franek

AC2T Research GmbH — Excellence Centre of Tribology, Wiener Neustadt, Austria, franek@ac2t.at

Keywords: porous bearings, laser claddings, additive degradation, MD simulation.

General situation. Tribology — similar to medical sciences — deals with complicated systems characterized by a lot of interactions of components and influencing parameters. From medical sciences we know measures or steps that can be seen as well in tribological research for and in close connection with industry: *diagnosis, therapy, pathology*, and *prophylaxis*. The Austrian Excellence Centre of Tribology (AC²T) offers relevant services in “tribological health care” as research provider to the industry — in Austria and international.

The institution. AC²T is a privately organized research institution (research GmbH), but superbly embedded into an Austrian governmental research funding program (“COMET”, open for partners worldwide) provides a comprehensive laboratory infrastructure (complemented by other institutions on site, viz. Technology & Research Centre Wiener Neustadt) and a staff comprising about 140 persons educated in the mother disciplines of tribology.

Selected research topics. *Diagnosis:* Porous journal bearings are used in large quantities. Wear resistance of such bearings operated at high loads and small rotational speed is methodically investigated in relation to their friction behaviour (and ascertain the lubrication conditions), in such way leading to rankings of bearing—oil combinations according to various tribological properties. [1] — *Therapy:* In metal forming applications the tools suffer from high wear attack under high temperature conditions. Ni-based self-lubricating coatings containing Ag and MoS₂ prepared by means of laser cladding provide an improvement in terms of both friction and wear at high temperature [2]. The addition

of MoS₂ enables achieving a uniform silver distribution within the resulting cladding by means of an encapsulation mechanism thus providing better lubrication and reducing wear susceptibility. — *Pathology:* Degradation of oils and additives are of major influence on the death of lubricated tribosystems especially in automotive applications. By the use of advanced analyses, e.g. mass spectrometry, the mechanisms of aging can be revealed. [3] — *Prophylaxis:* Modelling and simulation of tribological stresses and processes help to Analyses help to identify critical conditions and to derive targeted countermeasures as can, e.g., be demonstrated by MD simulation of a grinding process and its influences on a polycrystalline material, especially microstructural changes of grains, plastic deformation, twin formation, and rotation. [4]

Acknowledgements. Major parts of the research work resp. the examples reported here were supported financially by the Austrian COMET program, managed by the Austrian Research Funding Agency FFG (Project XTribology, no. 849109.)

1. Eder S.J., Ielchici C., Krenn S., Brandtner D., An experimental framework for determining wear in porous journal bearings operated in the mixed lubrication regime. *Tribology International* 123 (2018) 1—9
2. H. Torres, Slawik S., Gachot C., Prakash B., Rodríguez Ripoll M., Microstructural design of self-lubricating laser claddings for use in high temperature sliding applications. *Surface & Coatings Technology* 337 (2018) 24—34
3. Gabler C., Ristic A., Frauscher M., Dörr N., ZDDP degradation and tribochemistry revealed by mass spectrometry. 44th Leeds-Lyon Symposium on Tribology
4. Eder S.J., Gachot C., Cihak-Bayr U., Molecular dynamics simulation as a tool in materials tribology — nanoabrasion and nanosliding. 21st Colloquium “Tribology”, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, Germany (2018)

GREEN TRIBOLOGY — DEMANDS, PROBLEMS, SOLUTIONS

J. Padgurskas¹, D. Volskis², M. Rukanskis³¹Vytautas Magnus University, Kaunas, Lithuania, juozas.padgurskas@vdu.lt²Vytautas Magnus University, Kaunas, Lithuania, dariusvolskis@gmail.com³Vytautas Magnus University, Kaunas, Lithuania, rukanskis@gmail.com

Keywords: Green tribology, biodegradable, biomimetic, sustainable, renewable

Concept. Green tribology as a science and technology for "ecological balance and tribological aspects of environmental and biological effects" is application-oriented and embraces tribological environmental and biological aspects. This multidisciplinary area of science and technology is very important for the mechanics, materials, chemistry, live nature sciences and all modern industries. Green tribology plays an important role in ensuring that all industrial systems are environmentally friendly [1, 2].

Principles of green tribology: 1) Minimization of heat and energy dissipation; 2) Minimization of wear; 3) Reduction or complete elimination of lubrication and self-lubrication; 4) natural (e.g., vegetable oil-based) and 5) biodegradable lubrication; 6) Sustainable chemistry and green engineering principles; 7) Biomimetic approach; 8) Surface texturing; 9) Environmental implications of coatings and other methods of surface modification; 10) Design for degradation of surfaces; 11) Real-time monitoring, analysis, and control of tribological systems during their operation should be implemented to prevent the formation of hazardous substances; 12) sustainable energy applications.

Areas and directions of implementation. Using a biomimetic approach, biodegradable lubrication, spontaneous lubrication and other new techniques, as well as their application methods for sustainable engineering and energy production, will ensure a sustainable devel-

opment strategy, one of the main objectives of which is to reduce environmental pollution and promote sustainable consumption and production, meet the environmental requirements for economic growth. [3]. Therefore, integration in these areas remains a key challenge for green tribology and defines future research trends. These are the main areas of tribology that have the greatest impact on environmental issues and are therefore of paramount importance: 1. Biomimetic and self-lubricating materials / surfaces; 2. Biodegradable and environmentally friendly lubricants; 3. Tribology of Renewable and / or Sustainable Energy Sources. Combining these three areas, rather than focusing on narrow issues, would be of value to industry, where accidental loss or leakage of lubricants during use gets directly into the environment. This is particularly important in the water, agriculture and forestry sectors. There are no other alternatives to overcome these problems by replacing the use of fossil organic materials with an increasing proportion of alternative bio-based lubricants and by developing the use of waste materials of biological origin.

1. Nosonovsky M. and Bhushan B. Green tribology: principles, research areas and challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2010.
2. Nosonovsky M., Bhushan B. Green Tribology. Biomimetics, Energy Conservation and Sustainability. — Springer Verlag, 2012.
3. Chattopadhyay R. Green Tribology, Green Surface Engineering, and Global Warming eBook, Publisher: ASM International, 2014

ОСОБЕННОСТИ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ

А.М. Пашаев¹, А.Х. Джанахмедов¹, М.Я. Джавадов²

¹Азербайджанская Национальная Авиационная Академия, Баку, Азербайджан; ajanahmadov@gmail.com

²Азербайджанская Инженерная академия, Баку, Азербайджан

В статье раскрыты явления возникновения и развития электро- и тепловзрыва в подповерхностном слое полимерной накладки, а также разрядного явления, пробивающего слой между микровыступами накладки.

Ключевые слова: полимерная накладка, микровыступы, фрикционное взаимодействие, электрический и тепловой взрыв, электрический разряд.

Введение. Одним из важнейших разрешений научно-технического направления является создание полимерных материалов для фрикционных накладок, применяемых в металлополимерных фрикционных устройствах.

Цель работы — исследование возникновения и развития электро- и теплового взрыва в подповерхностном слое полимерной накладки, применяемых во фрикционных устройствах, а также разрядных явлений, пробивающих слой между микровыступами и контактирующими поверхностями.

Постановка задачи. В последнее время ряд исследователей обратили внимание на пробой полимерных диэлектриков [1, 2, 3]. В большинстве работ не было уделено достаточное внимание взрыву металлических включений, которые применяются в качестве наполнителя полимерных накладок, и последующему за ним тепловому разряду.

Известно, что одной из основных характеристик полимерных материалов является электропроводность — их способность пропускать электрический ток I (А) под воздействием электрического поля напряженностью E (В/м).

Изменение электропроводности и удельного объемного сопротивления ρ_v при увеличении поверхностной температуры тесно связано с подвижностью элементов структуры полимеров, определяемой химическим строением и составом. Кроме ионов на измеряемые значения электропроводности и ρ_v влияют также поляризационные и инжекционные явления.

Решение задачи. Механизм электропроводности полимерной накладки зависит от химического состава и структуры полимера, а также инъекции носителей зарядов.

Для подтверждения правильности рабочей гипотезы электровзрыва в подповерхностном слое полимерной накладки был выбран известный эффект переключения, индуцированный изменением граничных условий в паре трения "металл — полимер — металл". При этом представляется возможным реализовать эффект дистанционного переключения

в системе комбинированных пар трения «металл — полимер — металл» и «полимер — металл — полимер». Кроме того, при электротермомеханическом трении возникают физические условия, при которых эффект переключения в тонких полимерных пленках обусловлен исключительно электронными процессами. Установлено, что исследование эффекта переключения в полимерной пленке, индуцированного в таких условиях, при которых область изменения внешнего воздействия и область изменения электропроводности в полимерной пленке пространственно разделены.

Ранее нами установлено, что в процессах электротермомеханического трения в непрерывно возникающих электрических и тепловых микроцепях генерируются импульсные электрические и тепловые токи, посредством которых нагреваются и плавятся проволоки (электроды) полимерных микровыступов. При этом электроды нагреваются, и на них наблюдается рост падения напряжения. Кроме того, электроды нагреваются и в жидком состоянии до определенного момента времени, когда их сопротивление начинает возрастать не только за счет нагревания материалов, но и за счет их взрывного расширения. В некоторый момент времени электроды теряют металлическую проводимость, сопровождающейся ростом их сопротивления, которое становится на несколько порядков выше первоначального. Происходит обрыв тока в микроэлектроцепях. Возникший при этом импульс напряжения на индуктивности микроэлектроцепей в несколько раз превышает зарядное напряжение микроконденсаторов, которыми являются пятна контактов микровыступов металлического фрикционного элемента. Это и есть электрический взрыв, с помощью которого его продукты попадают в зазоры между микровыступами. При этом продукты взрыва между микровыступами претерпевают процессы увеличения объема и уменьшения их давления. Благодаря стабильному импульсному току и остаточному напряжению генерируется объемный заряд, способствующий развитию разряда для пробоя толщины слоя между микровыступами.

1. Janahmadov A.Kh., Javadov M. Fractal Approach to Tribology of Elastomers. — Switzerland. SPRINGER, 2018. — 441 p.
2. Джанахмедов А.Х., Пирвердиев Э.С., Вольченко А.И. и др. Узлы трения в машиностроении. — Баку: «Элм», 2018. — 440 с.
3. Чичинадзе А.В., Белоусов В.Я., Богатчук И.М. Износостойкость фрикционных полимерных материалов. — Львов: Вища школа, 1989. — 144 с.

ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

О.П. Паренаго

Институт нефтехимического синтеза РАН, Москва, Россия; parenago@ips.ac.ru

В настоящее время к современным смазочным материалам помимо их технических характеристик, обеспечивающих надежную работу всех узлов трения, значительное внимание уделяется экологическим аспектам их производства, применения и утилизации [1, 2]. В связи с этим все большее значение приобретает проблема получения биоразлагаемых пластичных смазок, которая становится наиболее актуальной в северных и арктических районах нашей страны.

В настоящее время в качестве базовых масел при получении биоразлагаемых смазок рассматривают пять основных групп химических веществ [3]: высоконенасыщенные растительные масла, низковязкие полиальфаолефины, полиалкиленгликоли, эфиры двухосновных кислот и эфиры полиспиртов.

Известно, что по биоразлагаемости (табл.) большое преимущество перед нефтяными маслами имеют растительные масла и синтетические эфиры.

Таблица. Биоразлагаемость базовых масел

Базовое масло	Биоразлагаемость, %
Нефтяное масло	20–40
Растительное масло	90–98
Синтетические эфиры	65–100

В докладе представлены результаты по разработке биоразлагаемых и низкотемпературных пластичных смазок, перспективных для использования в условиях Арктики и Крайнего севера. В качестве базовых масел были выбраны синтетические сложные эфиры двухосновных кислот (ДОС), а также эфиры триметилолпропана и пентаэритритового спирта с температурой плавления $-50 \div -60$ °С. Кроме этого, использовали полиальфаолефиновые масла с различной вязкостью, также имеющие низкую температуру застывания. Загустителями смазок служили органические соединения, потенциально обладающие высокой способностью к биоразложению: димочевина, а также целлюлоза и ее производные. В случае димочевина их синтез проводили *in situ* в среде базового масла взаимодействием толуолдиизоцианата, анилина и алифатического амина, в качестве которого использовали первичные амины с числом углеродных атомов 8, 12 и 16. Содержание загустителя в масле варьировали в пределах 10—25 мас. %.

В ходе работы определяли основные физико-химические свойства смазок: коллоидную стабильность, температуру каплепадения и предел прочности на разрыв. Кроме этого, исследовали реологию пластичных смазок и их противоизносную активность.

В результате сравнения физико-химических свойств пластичных смазок на основе сложных эфиров различного строения и димочевина в качестве за-

густителя показано, что все показатели увеличиваются с ростом количества загустителя. Найдено также, что перечисленные параметры для тех же базовых основ в целом более высокие при использовании производных целлюлозы как органических загустителей.

На рисунке приведены типичные кривые течения смазок на основе различных базовых основ и димочевинного загустителя.

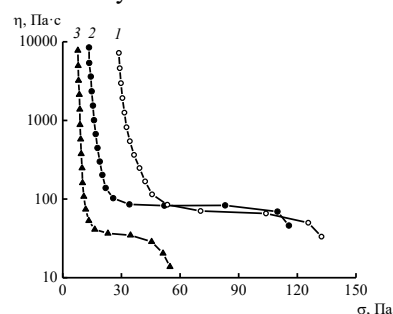


Рисунок. Кривые течения смазок при 25 °С на основе ДОС (1), NB-5750 (2) и NB-7300 (3), содержащих 10 мас. % загустителя на основе додециламина

Все композиции являются вязкопластичными системами, у них есть предел текучести, характеризующий прочность их структуры. Например, для смазки на основе ДОС переход к течению происходит при напряжении сдвига около 30—40 Па, а переход к скольжению — при напряжении порядка 130 Па. Смазка на основе ДОС имеет также наибольший модуль упругости, который характеризует смазку в состоянии покоя, т.е. ее коллоидную стабильность.

Важной характеристикой является эффективная вязкость, определенная при низкой температуре. Было показано, что она при скорости сдвига 10 с^{-1} и температуре -50 °С составляет около 500—900 Па·с, что отвечает необходимым требованиям.

Показатель противоизносной активности (диаметр пятна износа) практически во всех случаях составляет менее 0,6 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI60717X0181; Номер соглашения 14.607.21.0181).

- Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н., Багдасаров Л.Н. Смазочные материалы и проблемы экологии. М.: Нефть и газ. 2000. 423 с.
- Nagendramma P., Kaul S. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12 (2012) 764—774
- Biological Degradability of Lubricants in Natural Environment. CEC Code: CELS-103-12 (2014)

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ: МНОГОУРОВНЕВЫЙ МЕЗОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯС.В. Панин^{1,2}, С.В. Шилько³, Ю.М. Плескачевский⁴¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; svp@ispms.ru²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь⁴Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Введение. Традиционная методология создания антифрикционных и других функциональных композиционных материалов путем сопоставления результатов испытаний большого числа возможных составов (рецептур) является длительной и затратной. Решение данной проблемы можно ускорить применением компьютерного дизайна материалов, описанного, в частности, в публикациях авторов [1–3]. К весьма перспективным полимерам относится сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладающий одновременно превосходными механическими и антифрикционными свойствами. Однако высокий показатель текучести расплава СВМПЭ препятствует его переработке методами экструдирования и, в частности, методом 3D печати.

Целью работы является применение мезомеханического анализа при создании расходных материалов для 3D печати в виде полимер-полимерных композитов (ППК) на основе СВМПЭ для изготовления узлов трения сложной формы, работающих в экстремальных условиях (низкие температуры, агрессивные среды, высокие скорости и нагрузки).

Материалы и методы. В работе использованы СВМПЭ и полимерные пластификаторы из числа промышленно выпускаемых термопластов (полиэтилен, полипропилен); методы послойной экструзионной печати и горячего прессования; алгоритм расчетного определения управляющих параметров (параметров рецептуры), обеспечивающих требуемые значения эффективных характеристик многокомпонентных ППК при минимальном объеме экспериментальных данных; методы структурного анализа, механических и трибоиспытаний.

Результаты и их обсуждение. Из анализа экспериментальных зависимостей эффективных характеристик от управляющих параметров были предварительно построены поверхности отклика (рис.). Последующее компьютерное моделирование позволило найти область значений управляющих параметров для гарантированного достижения требуемых технологических и трибомеханических характеристик многокомпонентных ППК, отмеченную на рисунке. Расчетный оптимальный состав трехкомпонентной смеси обладает трибомеханическими свойствами на уровне ненаполненного СВМПЭ и текучестью расплава, пригодной для 3D-печати.

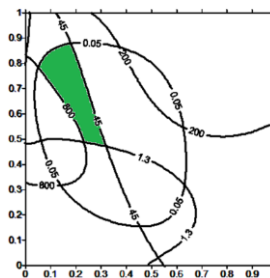


Рис. Область значений управляющих параметров, обеспечивающих соответствие физико-механических характеристик материала заданным ограничениям

Сопоставление характеристик материалов найденного состава показало, что по износостойкости, коэффициенту трения, модулю упругости, предельному удлинению, пределам текучести и прочности образцы композитов, изготовленные методом послойной экструзионной печати, превосходят аналогичные характеристики ППК, полученных компрессионным спеканием. Это обусловлено формированием более однородной надмолекулярной структуры с повышенной кристаллическостью.

Заключение. Показано, что инновационный подход в материаловедении на основе мезомеханического анализа и компьютерного дизайна позволяет значительно ускорить определение оптимальных составов функциональных композитов, в том числе создать полимер-полимерные СВМПЭ сплавы, пригодные для переработки методом 3D печати.

Благодарности. Исследование выполнено при финансировании из фонда президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8, РФФИ и БРФФИ (проект № 18-58-00037 (Т18Р-286).

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Под. ред. А.В. Герасимова. — Новосибирск: Изд.-во СО РАН. — 2017
2. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Панов И.Л. Получение заданных эффективных механических, теплофизических и электрических характеристик композиционных дисперсно-наполненных материалов // Перспективные материалы. — 2017. — № 5, С. 5—18
3. Шилько С.В., Плескачевский Ю.М., Панин С.В., Люкшин Б.А. Компьютерный дизайн полимерных композитов технического и медицинского назначения // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 3—4. — С. 149—157.

ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЕ СОПОЛИМЕРЫ ОЛЕФИНОВ И СМЕСИ ПОЛИОЛЕФИНОВ, ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ю.М. Кривогуз, С.С. Песецкий

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

Систематизирована информация о макромолекулярных превращениях, имеющих место в расплавах сополимеров олефинов (сополимеры пропилена с этиленом (с-ПП), этилена и винилацетата (СЭВА), этилена и высших олефинов (СЭВО), а также смесей полиолефинов (ПО): ПЭНП с ПП, СЭВА, стирольными термоэластопластами (СЭБС); ПП с этиленпропиленовым каучуком, сополимерами этилена и высших олефинов (СЭВО), стирольными термоэластопластами) при свободнорадикальной прививке полярных мономеров. Рассмотрены процессы, имеющие место при получении функционализированных продуктов методом реакционной экструзии (РЭ).

Приведены результаты оригинальных исследований анализа эффективности прививки, реологических, высокоэластических, релаксационных и механических характеристик функционализированных продуктов, а также структуры и свойств термопластичных композитов, получаемых при их использовании.

Установлено, что при функционализации СЭВА прививкой *транс*-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты (ТЭДК), инициированной пероксидом, возможно получение СЭВА-п-ТЭДК с эффективностью прививки (α) до 70%. Выход СЭВА-п-ТЭДК в значительной степени зависит от содержания винилацетатных групп в структуре макромолекул сополимера. При их низкой (12 мольн.%) и высокой (28 мольн.%) концентрации α снижается.

При функционализации с-ПП получить функционализированный продукт при полном подавлении процесса β -распада макромолекул не удастся. Вследствие этого фс-ПП обладает повышенной текучестью расплава, низкой энергией активации вязкого течения расплава и пониженной деформационной способностью.

При функционализации в расплаве смесей ПП/ПЭНП прививкой итаконовой кислоты (ИК) установлено противоположное влияние полимерных компонентов на эффективность прививки: добавки ПЭНП приводят к повышению выхода функционализированного продукта, а ПП — к его снижению. Обнаружен эффект влияния малых добавок ПЭНП и ПП на реологическое поведение (ПП/ПЭНП)-п-ИК: смеси, содержащие по 5 мас.% ПЭНП или ПП обладают, вопреки ожиданию, соответственно максимальной и минимальной текучестью расплава.

Для смесей ПЭНП/СЭВО, зависимость α от концентрации сополимера имеет экстремальный характер с максимумом при [СЭВО] = 30 мас.%. Ход побочных процессов при функционализации смесей ПЭНП/СЭВО также имеет сложный характер, что фиксируется по измерениям реологического поведения расплава.

При функционализации смеси ЛПЭНП и СЭБС наблюдается снижение выхода привитого продукта

(ЛПЭНП/СЭБС)-п-ТЭДК с увеличением концентрации блок-сополимера. От превалирования побочных конкурирующих процессов (сшивания и деструкции макромолекул) зависит уровень значений α и других характеристик.

Функционализация ТЭДК смесей ПП с насыщенными (сополимеры этилена с пропиленом, октен или СЭБС) и ненасыщенным (СБС) сополимерами выход привитого продукта, а также показатели реологических, механических и других свойств определяются, главным образом, фазовой структурой смеси. При преобладании фазы сополимера превалирует сшивание макромолекул.

Функционализация сополиолефинов и смесей ПО способствует интенсификации межфазной адгезии в их смесях с полярными термопластами и обеспечивает технологическую совместимость компонентов. Смеси обладают гетерогенной структурой, характеризующейся тонкодисперсным распределением дисперсной фазы фПО и отсутствием выраженных межфазных границ, что обуславливает повышение (в 2—3 раза) ударной вязкости и улучшение других механических характеристик по сравнению с исходными ПО. Многократное (до 10 раз) повышение ударной вязкости смесевых полиамидных и полиэфирных материалов достигается при их модифицировании функционализированными смесями ПЭ и ПП с сополимерами, обладающими свойствами эластомеров.

Показана высокая эффективность применения высокоиндексного ф-ПП в композитах на основе армированного коротким стеклянным волокном ПП: вследствие компатибилизации и интенсификации адгезии связующего к стекловолокну обеспечивается повышение механической прочности в 2-2,5 раза и ударной вязкости в 2,5-3,0 раза в зависимости от концентрации волокнистого наполнителя и типа функционализированного продукта. Использование ф-ПО для модифицирования ПА6, ПА66 и ПЭТ позволяет получать композиты с высокой вязкостью и прочностью расплава.

Для смесей ПА66/(ЛПЭНП/СЭО)-п-ТЭДК характерно феноменально резкое, более, чем на два десятичных порядка, снижение текучести расплава при достижении определенной степени прививки (для ПА66/(ЛПЭНП/СЭО)-п-ФК-28 мас.% эта концентрация составляет $\approx 0,78\%$). Прочность расплава при этом возрастает по сравнению с исходным ПА66 более чем в 30 раз. Обнаруженные эффекты положены в основу технологии принципиально новых типов смесевых полиамидных материалов, в том числе суперударопрочных композитов с высокой и управляемой вязкостью, а также прочностью расплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T18A3-001).

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 1

Структура и свойства композиционных материалов

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2019)

25—28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь

РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН

Л.П. Круль^{1,2}, Е.А. Назаров¹, Р.Л. Свердлов¹,
Л.Г. Резникова¹, М.В. Ласминская¹, Е.В. Гринюк^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; krul@bsu.by

Одним из методов модифицирования поверхности ультрафильтрационных полимерных мембран с целью изменения структуры и физико-химических свойств селективного слоя является адсорбция гидрофильных полимеров из растворов [1]. К числу таких полимеров относится полиакриловая кислота (ПАК). Возможность использования ПАК для улучшения свойств мембран определяется соотношением параметров ее растворимости в жидкостях, используемых для перевода полимера мембраны в раствор, а также в качестве осадителя основного полимера мембраны. Способность ПАК растворяться в этих жидкостях зависит не только от ее молекулярной массы, но и от конфигурации макромолекул как на уровне цепи в целом (линейный или сшитый полимер), так и на уровне дальнего конфигурационного порядка (атактический, изотактический или синдиотактический полимер). Известно, что радиационно-химическая полимеризация жидкой АК приводит к получению линейных и поперечно сшитых макромолекул ПАК в атактической и синдиотактической конфигурациях [2].

Цель работы заключалась в установлении влияния условий осуществления радиационной жидкофазной полимеризации акриловой кислоты (АК) на выход ПАК, а также в анализе ее фракционного состава.

Материалы и методы. В пробирку с коническим дном помещали жидкую АК, к которой добавляли толуол в количестве, необходимом для получения 10—50%-ного раствора. Использовали АК по ТУ 6-09-4131-83 производства ОАО «Реактив» (Россия), хранившуюся в течение нескольких лет в закрытом сосуде при комнатной температуре, и толуол по ГОСТ 5789-79. Очистку АК от примеси ПАК, образовавшейся в мономере в результате самопроизвольной полимеризации при длительном хранении, проводили фильтрованием. Облучение вели на гамма-установке МРХ-γ-25М (мощность дозы 0,11 Гр/с, температура комнатная, поглощенная доза излучения $D = (9,5—34,5)$ кГр. После облучения полимер измельчали и высушивали до постоянной массы. Выход ПАК рассчитывали как отношение массы образовавшегося полимера к массе мономера. Синтезированную ПАК фракционировали в аппарате Сокслетта с использованием воды в каче-

стве растворителя.

Результаты эксперимента и их обсуждение.

Выявлено, что в исследованном диапазоне D полимеризация протекает с высокой скоростью при концентрации АК в растворе, превышающей 40%, при этом процессу полимеризации предшествует индукционный период, продолжительность которого составляет около 90% от суммарного времени облучения.

Установлено, что продукт полимеризации представляет собой смесь различных форм ПАК, отличающихся конфигурацией макромолекул. Компоненты смеси различаются по растворимости в воде. Смесь включает: 1) ПАК, растворимую в горячей (80—100 °С) воде; 2) ПАК, растворимую в холодной воде (комнатной температуры); 3) ПАК, не растворимую в холодной воде, но растворимую в горячей воде. Не исключено наличие в смеси ПАК, не растворимой ни в холодной, ни в горячей воде.

Прозрачный раствор ПАК, образующийся в горячей воде, при охлаждении мутнеет, однако центрифугирование приводит к разделению его на две составляющие: прозрачный раствор и осадок, при этом масса осадка не превышает 10% от общего количества ПАК, растворимой в горячей воде.

Существенно, что при радиационной полимеризации технической АК значительная ее часть превращается в ПАК, растворимую в горячей воде. Эту форма ПАК представляет интерес как добавка для непосредственного использования в водном осадителе, применяемом при формировании ультрафильтрационных мембран.

Для установления конфигурации макромолекул различных форм ПАК эффективным оказалось совместное привлечение золь-гель анализа и различных методов исследования фазовой структуры твердых полимеров (ИК спектроскопия, рентгенография, дифференциальный термический анализ и т.п.).

1. Бильдюкевич А. В. Модификация поверхности полимерных мембран (обзор). // Полимерные материалы и технологии. 2017 (3), № 4, 6—18.
2. Chapiro A., Sommerlatt T. Polymerisation radiochimique de l'acide acrylique en phases liquide et solide—II. Examen des polymeres formes—discussion. // European Polymer Journal — 1969 (5), 725—745.

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ И АППРЕТИРОВАННОГО БЕНТОНИТА

Н.Т. Кахраманов, Р.В. Курбанова

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

Формирующийся в нанокompозитах структура органо-неорганических гибридов представляет собой — элементоорганический прекурсор в составе полимерной матрицы. Принимая во внимания, что в качестве наполнителя использовали наночастицы бентонита, то следует полагать о возможном взаимодействии этих компонентов на молекулярном уровне. Первоначально процесс аппретирования бентонита с АГМ-9 способствовал формированию элементоорганического прекурсора, который в результате реакции гидролиза и дегидратации способствовал образованию сшитой структуры в виде монослоя «паутины», обволакивающей минеральную наночастицу. Такая сшитая структура прекурсора имеет одно важное преимущество и заключается она в том, что в процессе смешения наночастиц в расплаве она сводит до минимума возможность их агломерации. И интерпретируется это обстоятельство наличием прослойки монослоя аппрета на поверхности наночастиц. Наличие в составе бентонита наноглины, также, вносит ощутимые коррективы в изменение основополагающих свойств композитов [1].

В связи с этим, экспериментальные исследования проводили в 3 этапа: оценивали свойства нанокompозитов на основе исходного ПЭВП и бентонита, на основе ПЭМАК (привитого сополимера ПЭВП с МАК) и бентонита, а также, на основе ПЭМАК с аппретированными наночастицами бентонита. Первый этап исследования характеризуется тем, что введение до 5.0 мас.% бентонита в состав исходного ПЭВП приводит к некоторому улучшению прочностных свойств и ПТР композитов. В межслоевом пространстве наноглины возможно наличие полярных жидкостей (глицерина), обменных катионов или анионов, или поверхностно-активных веществ. По всей вероятности, после распада слоевых структур на более мелкие эти полярные жидкости способны мигрировать в полимерную матрицу, которые подобно агентам смазки способствуют улучшению ПТР образцов. в межслоевом пространстве наноглины возможно наличие полярных жидкостей (глицерина), обменных катионов или анионов, или поверхностно-активных веществ. По всей вероятности, после распада слоевых структур

тур на более мелкие эти полярные жидкости способны мигрировать в полимерную матрицу, которые подобно агентам смазки способствуют улучшению ПТР образцов [2]. Второй этап исследования предусматривает изучение влияния ПЭМАК на свойства нанокompозитов на его основе. Согласно полученным данным значительный эффект достигается в улучшении прочностных свойств, относительного удлинения и теплостойкости нанокompозитов. Интерпретируется это тем, что в данном случае привитые цепи способствуют улучшению адгезии между неаппретированными наночастицами и полярной полимерной матрицей, что, в конечном счете, выражается в некотором возрастании физико-механических свойств. Как правило, образующийся в приграничной зоне адгезионный монослой, является следствием протекания микрореологических процессов на развитой поверхности неаппретированной наночастицы. Микрореологические процессы, протекающие в процессе интенсивного термомеханического смешения в режиме расплава, характеризуются тем, что адгезив при условии хорошей совместимости компонентов смеси затекает в поры и трещины на поверхности субстрата с последующим затвердеванием.

Третий этап исследований охватывает наиболее оптимальный вариант подбора типа компонентов в смеси нанокompозита: функционализированный ПЭВП (ПЭМАК) и аппретированные наночастицы бентонита. Установлено, что кроме ПТР, все свойства нанокompозитов имеют максимальные значения. Этот эффект обеспечивается, за счет улучшения технологической совместимости минерально-органической системы и установления ковалентных связей между всеми рассматриваемыми компонентами смеси с образованием двухступенчатых сшитых структурных фрагментов: между частицами наполнителя и аппретом, а также, между аппретом и полимерной матрицей.

1. Чердынцева С.В., Белоусов С.И., Крашенинников С.В. Влияние вида органического модификатора монтмориллонита на физико-химические свойства нанокompозитов на основе полиамида-6, полученных смешением в расплаве. // Пластические массы, 2013, № 5, с. 39—43.
2. URL <http://www.miningenc.ru/m/montmorillonit/>

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ РАДИОЛИЗОВАННОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Е.М. Толстомятов¹, С.Р. Аллаяров²¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,
tolstomyatov@mpri.org.by²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

Рядом исследований было показано, что состав продуктов абляции политетрафторэтилена (ПТФЭ) непрерывным излучением CO₂ лазера в вакууме существенно зависит от дозы предварительной обработки ионизирующей радиацией [1]. В этих работах основное внимание уделялось волокнистой фракции, выход которой сложным образом изменяется при изменении дозы облучения.

Целью работы являлся анализ возможных физико-химических процессов, протекающих при лазерном облучении промышленного и предварительно обработанного ионизирующей радиацией ПТФЭ.

Материалы и методы. В качестве мишени использован промышленный (в состоянии поставки) ПТФЭ в форме монолитного блока. Лазерная абляция (ЛА) проводилась на установке ВУП-4, оснащённой CO₂ лазером ЛГН-703, в двух режимах: **I**) при непрерывном воздействии лазерного луча естественной интенсивности, и **II**) в квазимпульсном режиме, обеспечивающем низкоинтенсивный абляционный поток без образования волокон в кратере. В режиме **II** продукты абляции собирались на стеклянной подложке, помещённой на пути факела.

Предварительный радиолит образцов проводился γ -излучением ⁶⁰Со на УНУ «Гамма-100» ИПХФ РАН и ускоренными электронами с энергией 1–4 МэВ. Полученные продукты абляции изучались методами ИКС, малоугловой рентгеновской дифракции (МРД), ЭПР и ДСК.

Результаты и их обсуждение. Основным газообразным продуктом ЛА первичного полимера в режиме **I** является тетрафторэтилен (ТФЭ). Однако из результатов РФЭС (рис. 1) материала поверхностного слоя кратера и волокон следует, что при ЛА происходит не только деполимеризация, характерная для термической деструкции, но и модифицирование химического строения макромолекул. Как было установлено ранее [2], в продуктах повторной абляции модифицированного таким образом полимера появляется конденсируемая фракция, по ИК спектрам тождественная первичному ПТФЭ.

Другой особенностью обработанного ЛА первичного ПТФЭ, обнаруженной методом МРД, является наличие внутри поверхностного слоя и волокон нанопор размером до 40 нм. Оценки показывают, что нанопоры могут быть образованы в результате цепного распада одной макромолекулы.

Воздействие ионизирующих излучений приводит структурно-химические изменения в ПТФЭ [3], подобные показанным на рис. 1. Кроме этого,

молекулярные цепи дробятся на фрагменты в результате диссоциации или ослабления скелетных связей в случайных местах. Распределение фрагментов по размерам зависит от дозы радиации. Последующая ЛА в режиме **II** приводит к термической деполимеризации при температуре ниже 600 °С. Одновременно испаряются олигомерные фрагменты, образованные при радиолит. Последние, конденсируясь на поверхностях с более низкой температурой, формируют покрытие.

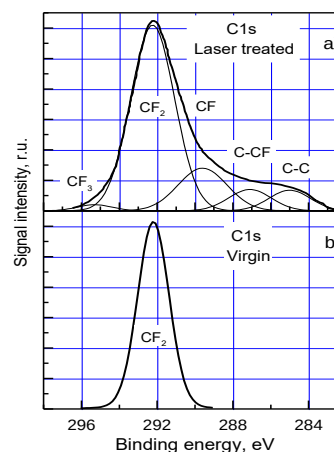


Рис. 1. РФЭС облучённого лазером (а) и первичного (б) ПТФЭ

Аналогичные процессы протекают при ЛА первичного ПТФЭ при возбуждении электрического разряда в зоне кратера. При этом действие жёсткого вакуумного ультрафиолета производит такие же структурно-химические изменения в макромолекулах, как и γ -излучение.

Предложенный механизм комбинированного воздействия ионизирующего и лазерного излучений проверен экспериментально. ИК спектр полученных покрытий идентичен спектру первичного ПТФЭ.

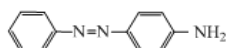
Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физматтех», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии», задания 6.04, 6.67 (Беларусь) и Государственного задания (РФ) по теме № 0089-2019-0008.

1. Толстомятов Е.М., Аллаяров С.Р., Гракович П.Н., Ольхов Ю.А., Калинин Л.А. Радиолит термопластичных полимеров // Пласт. массы. — 2012, № 6, 13–23
2. Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Калинин Л.А., Рябенко И.Л., Толстомятов Е.М., Красовский А.М. Лазерная абляция политетрафторэтилена // Рос. хим. журнал. — 2008, № 3, 97–105
3. Lappan U., Geiöler U., Scheler U. The Influence of the Irradiation Temperature on the Ratio of Chain Scission to Branching Reactions in Electron Beam Irradiated Polytetrafluoroethylene (PTFE) // Macromol. Mater. Eng. — 2007 (292), 641–645.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИВИНИЛСПИРТОВЫХ ПЛЕНОК,
СОДЕРЖАЩИХ ДИХРОИЧНЫЕ КРАСИТЕЛИ И КОМПОЗИТ
ПОЛИАНИЛИН/СЕРЕБРОЛ.Н. Филиппович¹, Ж.В. Игнатович², Х.А. Новик², С.Н. Шахаб¹¹Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь²Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ignatovich@ichnm.basnet.by

Введение. Электропроводящий полианилин (ПАНИ) и его композиты с наночастицами (НЧ) металлов широко используются при создании электронных устройств, нелинейной оптики, топливных элементов [1]. Наночастицы серебра (Ag), обладающие уникальными оптическими свойствами и др., являются перспективными компонентами композитных наноматериалов [2].

Цель работы — изучить влияние композита ПАНИ/Ag на оптические свойства поливинилспиртовых (ПВС) пленок, окрашенных коммерческим красителем *Chicago Sky Blue 6B* (CSB) и синтетическим красителем — (4-(фенилдиазе-нил)анилин (ПАЗБ0):



Материалы и методы. К 200 мл дистиллированной воды добавили 1,8 мл (0,02 моль, 12 экв.) анилина при перемешивании на магнитной мешалке. К полученной эмульсии добавили 0,272 г (0,0016 моль, 1 экв.) AgNO₃ и продолжали перемешивать на свету в течение 6 ч. Полученный осадок композита ПАНИ/Ag отделяли центрифугированием при 15000 об/мин. в течение 15 мин с последующей промывкой дистиллированной водой и этанолом, хранили при ~6 °С.



Рис. 1. СЭМ изображение композита ПАНИ/Ag

Состав (%) композита ПАНИ/Ag: НЧ Ag (78,3), С (12,32), N (9,1) по данным элементного анализа на ЭДС-детекторе JEOL (Япония). Агломерация композита ПАНИ/Ag в водной среде приводит к увеличению гидродинамического диаметра: гидродинамический диаметр агломератов в концентрированном золе равен 3,7 мкм (табл. 1) и совпадает с данными СЭМ (рис. 1).

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), Н₃ВО₃ (0,05—0,10), красители (0,015), ПАНИ/Ag (0,5 мл), этанол (5,0—7,5) и вода (до 100%) [2]. Пленки растягивали в 4%-ном растворе Н₃ВО₃, промывали в дистиллированной воде и термофиксировали 1 ч в термокамере. Толщина пленок после одноосной ориентации в 3,5—4,0 раза составила 50—60 мкм.

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):

$$ПС = (T_{\perp} - T_{\parallel}) / (T_{\parallel} + T_{\perp}) \cdot 100\%,$$

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 [3].

Результаты и их обсуждение. Анизотропные пленки, окрашенные ПАЗБ0 и CSB характеризуются высокой поляризующей способностью 90—99% (табл. 2).

Таблица 1. Гидродинамические характеристики композита ПАНИ/Ag, диспергированного в дистиллированной воде

Образец	Разведение золя (раз)	Средний диаметр частиц, нм	Индекс полидисперсности PDI
Композит ПАНИ/Ag	10	3700	0,990
	20	5440	0,985
	40	3400	0,995
	100	2020	1,000

Таблица 2. Спектральные характеристики ПВС-пленок, окрашенных ПАЗБ0 и CSB и содержащих ПАНИ/Ag

Образец пленки	C (мас.%) / V, мл	λ , нм	ПС, %
ПАЗБ0	0,15	353—466	90-99
ПАЗБ0 / ПАНИ/Ag	0,15/ 5 мл	387—466	90-97
CSB	0,15	594—690	90-97
CSB / ПАНИ/Ag	0,15/ 5 мл	585—691	90-98

При включении ПАНИ/Ag в ПВС-пленку с ПАЗБ0 спектральный диапазон сузился до 387—466 нм с сохранением высокой ПС 90—97%, а в присутствии композита в окрашенной CSB пленке спектральный диапазон значительно расширился до 585—691 нм и возросла ПС с 97 до 98% (табл. 2). Встраивание ПАНИ/Ag в ПВС-пленку положительно влияет на ее спектральные характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, проект X18-029.

1. Yunus S., Attout A., Bertrand P. Langmuir. Controlled aniline polymerization strategies for polyaniline micro- and nano self-assembling into practical electronic devices. 2009. Vol. 25, 1851.
2. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия. — 2000. 672 с.
3. Алмодарресие Х.А. Поляризационные пленки широкого спектрального диапазона на основе поливинилового спирта, дихроичных красителей и наночастиц. Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Минск, — 2014. — 22 с.

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ТЕРПЕНОИДНОМАЛЕИНОВЫЕ АДДУКТЫ — ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОТВЕРДИТЕЛИ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ

И.А. Латышевич, Е.И. Гапанькова, А.Ю. Ключев, Н.Г. Козлов

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

Растущая потребность многих отраслей народного хозяйства в продукции лесохимической промышленности требует разработки новых высокоэффективных и практически важных продуктов на основе экстрактивных веществ сосны обыкновенной (*Pinus Silvestris* L.). Особое место среди продуктов лесохимического производства занимают скипидар и канифоль, содержащие терпеновые углеводороды и смоляные кислоты. Модификация данного сырья позволит получить продукты, обладающие улучшенными физико-химическими свойствами по сравнению с исходным сырьем.

Наличие в Республике Беларусь достаточной сырьевой базы (отечественного возобновляемого терпеноидного сырья) для производства канифоли и скипидара, а также возможности их переработки во вторичные продукты на предприятиях химического профиля делают актуальными исследования по созданию новых эффективных терпеноидных продуктов и практически важных композиционных составов целевого назначения на их основе [1, 2].

Согласно литературным данным вторичные терпеноидные продукты — терпеноидномалеиновые аддукты (ТДМА) [3] являются перспективными отвердителями эпоксидных смол и могут быть использованы в электротехнической промышленности для защиты изделий из меди, используемой в производстве.

Однако полученные нами лаковые покрытия с использованием в качестве отвердителя ТДМА имели низкие физико-механические показатели: адгезию, механическую прочность, твердость и эластичность.

Поэтому целью исследования являлась разработка термоотверждаемых композиций с использованием в качестве отвердителя модифицированных ТДМА для повышения эксплуатационных свойств.

Модификация ТДМА проводилась ацетатом цинка. Данный модификатор был выбран на основании научного и патентного поиска. В результате взаимодействия ТДМА с ацетатом цинка образуется резинат, который используется в лакокрасочной промышленности в качестве сиккативов, т.е. модифицированные ТДМА выступают не только в качестве отвердителя, но и позволяют снизить время и температуру отверждения термоотверждаемых лакового покрытия.

ТДМА являются сложными техническими многокомпонентными смесями, состав которых определяется видом сырья и условиями их получения [4].

Термоотверждаемые композиции получали путем смешивания исходных компонентов при нагревании. Композиции наносились на предварительно

нагретую медную пластину 60x100x0,6 мм с помощью аппликатора (толщина слоя 100 мкм). Подготовка поверхности пластины перед нанесением обеспечивает смачиваемость композицией. Для этого механическую обработку металлических поверхностей осуществляли очисткой наждаком или металлической щеткой с последующим обезжириванием бензином или ацетоном, а затем промывали водой и сушили горячим воздухом. Медные поверхности с нанесенными на них термоотверждаемыми композициями помещали в термошкаф и при температуре 160±5 °С отверждали в течение 30 мин. Затем поверхности охлаждали до 20 °С.

Химическое модифицирование аддуктов ТДМА ацетатом цинка приводит к росту физико-механических характеристик полученных лаковых покрытий. При этом с увеличением глубины модифицирования наблюдается рост прочности при ударе (ГОСТ 4765–73) с 25 до 100 см и адгезии (ГОСТ 31149–2014), а твердость (ГОСТ 5233–89) при этом снижается с 0,6 до 0,3 отн. ед. Для всех лаковых покрытий, полученных с использованием синтезированных продуктов один из эксплуатационных показателей лаковых покрытий — удельное объемное электрическое сопротивление — больше 10¹³ Ом·см.

Таким образом, температура отверждения эпоксидной смолы Э-40 ТДМА — 200 °С. Использование в качестве модификатора ацетата цинка приводит к снижению температуры (на 40 °С) и времени (в два раза) отверждения лакового покрытия. С увеличением глубины модифицирования происходит рост физико-механических характеристик: прочность при ударе увеличивается в 5 раз, твердость — в 2 раза и адгезия — до 1 балла.

1. Ключев А.Ю., Козлов Н.Г., Прокопчук Н.Р., Скаковский Е.Д., Латышевич И.А. Получение терпеноидномалеиновых аддуктов, свойства и применение // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. — 2016, № 4, 110–120.
2. Ключев А.Ю., Козлов Н.Г., Прокопчук Н.Р., Скаковский Е.Д., Латышевич И.А. Получение терпеноидномалеиновых аддуктов, свойства и применение (окончание) // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. — 2017, № 1, 109–128.
3. Прокопчук Н.Р., Ключев А.Ю., Козлов Н.Г., Латышевич И.А. Использование эпоксидных смол в термоотверждаемых композициях (Обзор) // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. — 2016, № 4 (186), 87–99.
4. Латышевич И.А., Ключев А.Ю., Козлов Н.Г., Прокопчук Н.Р., Огородникова М.М. Получение, исследование состава и применение терпеноидномалеиновых аддуктов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2017, Вып. 221, 294–308.

SYNERGY EFFECTS IN HYBRID MWCNT/MnFe₂O₄/EPOXY RESIN COMPOSITESD. Meisak¹, J. Macutkevicius¹, J. Banys¹, P. Kuzhir²¹Physics Faculty, Vilnius University, Vilnius, Lithuania; dariameysak@gmail.com²Institute for Nuclear Problems BSU, Minsk, Belarus

Multiwall carbon nanotubes (MWCNT) are very useful and promising material for the production of polymer composites with controlled dielectric properties [1]. The filler content, type of dispersion and polymer matrix are the most important parameters defining the dielectric properties of composites in wide frequency range. The addition of a small amount of nanotubes can make the composite conductive and also allows the good mechanical properties of the pure polymer matrix to be maintained.

With an increase of nanotubes content in the composite, one may encounter the problem of the lack of a filler dispersion homogeneity. Moreover, the nanotubes are quite expensive material due to the complexity of their production. Therefore, finding ways to reduce the use of nanotubes while maintaining their benefits is of great importance.

In the present work the hybrid epoxy resin composites filled with MWCNT and the magnetic MnFe₂O₄ nanopowder (average diameter of spherical particles is 28 nm) were investigated by means of dielectric spectroscopy in order to find the synergistic effects.

Materials and Methods. Commercial Epikote 828 epoxy resin was used as a polymer matrix. The MWCNT grown by the CVD method [2] and commercially available manganese ferrite (MnFe₂O₄) nanopowder with 28 nm particle size [3] were used as fillers. Unlike MWCNTs, manganese ferrite is easily to disperse in the polymer matrix. Thus it is possible to produce composites with high volume concentrations of MnFe₂O₄. To prepare the composites the standard procedure for filler particles dispersing in a polymer matrix was used [1]. The investigated three-phase MWCNT/MnFe₂O₄/epoxy resin composites had a fixed 0.35% MWCNT volume concentration, while MnFe₂O₄ concentration varied: 0, 0.025, 0.05, 0.35, 0.65 vol.%. The selected MWCNT concentration is close to the percolation threshold to form a conductive network inside the composite. The complex dielectric permittivity was measured using HP4284A LCR meter in the frequency range from 20 Hz to 1 MHz.

Results and Discussion. According to the literature the synergy effect was successfully observed in composites based on two different carbon allotropes (one of which is MWCNT) [4], which consisted in achieving percolation at concentrations that did not lead to DC conductivity in the corresponding monofiller cases.

In our case, the second filler is non-carbon and in order to achieve the electrical percolation in the corre-

sponding monofiller composites, a huge (about 30 vol.%) concentration of it is necessary. The making of hybrid composites allows to reduce the necessary amount of both components, and therefore simplify their dispersion into the matrix.

Fig. 1 shows the frequency dependence of the conductivity for all samples studied.

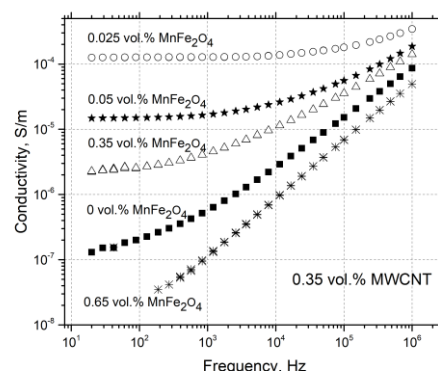


Fig. 1. Frequency dependence of the conductivity for epoxy resin hybrid composites with 0.35 vol.% MWCNT and 0–0.65 vol.% MnFe₂O₄ nanopowder at room temperature

Thus, with the addition of a small amount of MnFe₂O₄ (0.025 vol.%), the dielectric permittivity and DC conductivity values increased. With a further increasing of MnFe₂O₄ content, the ϵ and σ_{dc} parameters decrease, and with a maximal concentration (0.65 vol.%), the composite becomes non-conducting.

These results reveal that certain small amounts of MnFe₂O₄ particles contribute to better MWCNT dispersion inside the epoxy resin.

Acknowledgment. This research was partially supported by the Research Council of Lithuania according to the Lithuanian-Belarus collaboration Program Project (no. S-LB-19-8/(1.78) SU-129.

1. Bychanok D. and Gorokhov G. Design of carbon nanotube-based broadband radar absorber for Ka-band frequency range // *Prog. Electromagn. Res. M.* — 2017 (53), 9–16.
2. Okotrub A. and Bulusheva L. Arrays of carbon nanotubes aligned perpendicular to the substrate surface: anisotropy of structure and properties // *Nanotechn. In Russia.* — 2008 (3), 191–200.
3. <https://www.us-nano.com/>
4. Kranauskaite I. and Macutkevicius J. Synergy effects in the electrical conductivity behavior of onion-like carbon multiwalled carbon nanotubes composites // *Phys. Status Solidi B.* — 2015 (252) № 8, 1799–1803.

ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF COMPOSITES
WITH ONION-LIKE CARBONJ. Macutkevici¹, J. Banys¹, S. Moseenkov², V. Kuznetsov², O. Shenderova³¹Vilnius university, Sauletekio av. 3, Vilnius, Lithuania, jan.macutkevici@gmail.com²Borisevsk institute of catalysis, Lavrentev av. 5, Novosibirsk, Russia³International Technology Center, Raleigh, North Carolina, USA

Electrically percolative polymer-based composites have been attracting much attention because of their potential applications such as electroactive materials, sensitive materials, and electromagnetic coatings. Owing to the advanced electrical, thermal, and mechanical properties, various carbon nanoparticles like carbon nanotubes or carbon black have been widely studied and often used as nanofillers in the past few years. However, such ideal situation assumes a completely random filler distribution, and as soon as such condition is not met due to small changes in the composite preparation process, very different percolation thresholds can be obtained, all other things being equal. Other aspects to be considered are cost and potential toxicity of nanoparticles at the moment of preparing the composites.

In this work results of broadband dielectric (20 Hz — 3 THz) spectroscopy of composites filled with onion-like carbon are presented in wide temperature range (20 K — 500 K).

The onion-like carbons (OLCs), consisting of stable defected multishell fullerenes, exhibit the high conductivity similar to carbon nanotubes. The electrical percolation thresholds for OLC embedded in various polymers like Poly(methylmetacrylate) (PMMA), Polyurethane (PU), Polydimethylsiloxane (PDMS) and epoxy resin were estimated. It was found also that the percolation threshold is dependent from OLC aggregate size. It was demonstrated that after annealing of OLC/PMMA and PU composites above the glass transition temperature the percolation threshold decreases. Close to the percolation threshold the value of the complex dielectric permittivity is very high in all investigated frequency range from hertz to terahertz. Therefore, investigated OLC composites are promising candidates for various electronic applications. The dielectric properties of pure OLC powder were also investigated in a wide frequency range as well. In OLC/PDMS composites above the percolation threshold a metal-insulator transition was observed at higher temperatures. The dielectric properties of composites above percolation threshold were investigated in terms of complex impedance Z^* , which is related with complex dielectric permittivity via relation $Z^* = 1/(\epsilon^* \epsilon_0 \omega)$. The complex impedance was modeled as the infinite circuit of RC circuits connected in serial.

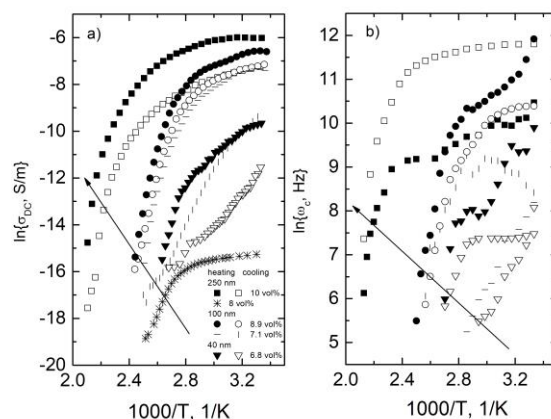


Fig. 1. Temperature dependence of OLC/PDMS composites DC conductivity and critical frequency

From frequency dependence of conductivity it is to determine the DC conductivity and the critical frequency values (the frequency at which the value of conductivity is 10% higher than the DC conductivity value). The results for OLC/PDMS composites are plotted in Fig. 1. It is clearly evident that both DC conductivity and critical frequency f_{cr} are almost temperature independent at lower temperatures and rapidly decreases close to the some temperature, which is depended from OLC aggregate size and concentration. Above this temperature no DC conductivity occurs in composites, therefore it is observed a metal-dielectric phase transition. Note that the complex dielectric permittivity of pure PDMS polymer matrix only very slowly increases with temperature, not demonstrate any anomaly and its values remains quite low ($\epsilon^* < 5-1.5 \cdot i$, below 500 K) in temperature region 300—500 K. For composites under study σ_{DC} and f_{cr} are almost temperature independent far from the metal-dielectric transition temperature, thus in this temperature region z is almost zero. Close to the metal-dielectric transition temperature both DC conductivity and critical frequency rapidly decreases and the critical exponent is 1.5 in this temperature region for all composites.

This research was partially supported by the Research Council of Lithuania according to the Lithuanian-Belarus collaboration Program Project (no. S-LB-19-8/(1.78) SU-129).

ЗАКРЕПЛЕНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ АНТИПИРЕНОВ НА ПОЛИЭФИРНЫХ ВОЛОКНАХ ПОСРЕДСТВОМ АЦЕТОНОВЫХ ЗОЛЕЙ SnCl_2

О.В. Рева, А.Н. Назарович, Д.В. Криваль

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, volha107@rambler.ru

Введение. Ранее нами установлено, что для хемопривязки металлофосфатных антипиренов к поверхности полиэфирных волокон эффективны спиртовые коллоидные растворы SnCl_2 , более стабильные к окислению и гидролизу соединений Sn(II) , чем водные и водно-спиртовые [1]. Ацетоновые и водно-ацетоновые растворы SnCl_2 в литературе не описаны, но помимо хорошей растворимости неорганических солей и низкой — кислорода, предположительно, способны к частичной деструкции поверхности полиэфира.

Цель работы: исследовать характеристики коллоидных частиц в ацетоновых и водно-ацетоновых растворах SnCl_2 в зависимости от природы стабилизирующей добавки и времени их хранения для определения условий длительного существования активных нанодисперсных частиц, обеспечивающих хемосорбцию азот-фосфор содержащих замедлителей горения к полиэфирным тканевым материалам.

Результаты и обсуждение. Методом оптической спектрофотометрии установлено, что ацетоновые и водно-ацетоновые растворы SnCl_2 более стабильны по отношению к гидролизу и окислению соединений Sn(II) по сравнению с водными и спиртовыми растворами, что иллюстрируется длительным (до 50 и более суток) сохранением положения края и формы полосы поглощения в спектрах всех изученных растворов в УФ области.

Для водных растворов SnCl_2 этот период составляет 2—4 суток, для спиртовых — 40—45 суток.

Методом просвечивающей электронной микроскопии доказано, что в ацетоновых растворах образование коллоидных частиц начинается только после 12—15 суток их хранения (1—3 суток для водных и 7—10 суток для спиртовых растворов) и эти частицы долго сохраняют оптимальные частотно-размерные характеристики, рис. 1, 2.

В результате проведения ступенчатой огнезащитной обработки полиэфирной ткани установлено, что наибольшее количество металлофосфатного антипирена $\sim 1,25$ мг/дм² закрепляется на поверхности ПЭТФ в случае использования для создания адгезионного подслоя ацетонового раствора SnCl_2 без добавок. Это количество в 1,5—2 раза больше, чем во всех прочих случаях и составляет 2,3% после гидролизной обработки, табл.

Устойчивость огнезащитной обработки неорганическими замедлителями горения к стирке после активации ПЭТФ ацетоновыми растворами SnCl_2 является доказательством химического закрепления

замедлителя горения на полиэфирной матрице через медиативный слой наноразмерных частиц соединений двухвалентного олова. Это взаимодействие более эффективно, чем в случае спиртовых растворов.

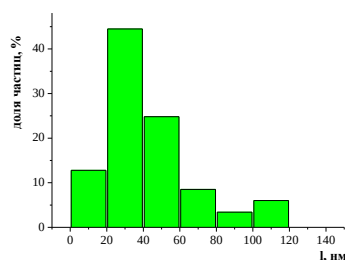


Рис. 1. Распределение по размерам частиц в объеме ацетонового раствора SnCl_2 со сроком хранения 15 суток

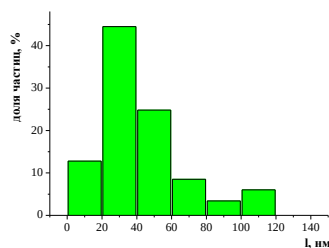


Рис. 2. Распределение по размерам частиц в объеме ацетонового раствора SnCl_2 со сроком хранения 45 суток

Таблица. Результаты огнезащитной обработки и огневых испытаний полиэфирного полотна

Добавка в раствор SnCl_2	Δm , %	τ горения, с	l прогара, мм	Классификация по горючести
необраб. ПЭТФ	—	10—15	160	Легковоспл.
—	2,3	2	10	Трудновоспл
этилендиамин	1,5	2—3	13	Трудновоспл
фосфат 5-аминотетразола	1,4	2—4	16	Трудновоспл
этилендиамин + вода	1,4	2—4	14	Трудновоспл
HCl + вода	1,5	3	12	Трудновоспл
фосфат 5-аминотетразола + вода	1,3	4	15	Трудновоспл
вода	1,4	5	16	Трудновоспл
HCl	1,2	9	86	Легковоспл

- О.В. Рева, В.В. Богданова, А.В. Врублевский, А.Н. Назарович Исследование закономерностей формирования и характеристик коллоидных частиц в оловосодержащих органоэолях, предназначенных для активации поверхности полиэфирных волоконистых материалов / Журнал Прикладной Химии. — 2017. — Т. 90. — Вып. 6. — С. 778—786.

ХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИАМИДНЫХ ВОЛОКОН ПЕРЕД ОГНЕЗАЩИТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

О.В. Рева, Д.В. Криваль

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, volha107@rambler.ru

Введение. Поверхностная огнезащитная обработка готовых синтетических волокон и тканей является наиболее распространенным и технически простым методом. Однако в случае полиамидных волокон с гладкой, химически инертной поверхностью эффективные нетоксичные антипирены — азот и фосфорсодержащие неорганические соединения [1] — не закрепляются на изделии в достаточных количествах. Нами был разработан метод химической прививки антипирена к поверхности полиэфирного материала с использованием коллоидных частиц соединений Sn(II) [2,3]; и установлено, что доминирующее влияние на устойчивость огнезащитной обработки к стирке оказывает состав раствора предварительного травления, обеспечивающий создание на поверхности полиэфира активных групп. В меньшей степени на прочность огнезащитной обработки влияет состав раствора SnCl_2 , в котором на протравленной поверхности формируется медиативный слой наноразмерных коллоидных частиц.

Целью данной работы было изучение возможности химической прививки нетоксичного неорганического металлофосфатного антипирена к поверхности полиамидного волокна, отличающегося химической природой, и влияния условий обработки на ее эффективность.

Результаты и обсуждение. Выявлено, что в случае полиамидного волокна, также, как и полиэфирного, состав активирующего раствора SnCl_2 хотя и оказывает некоторое влияние на количество и прочность привязки к полимеру замедлителя горения, но существенно меньшее, чем состав композиции предварительного травления. Так, максимальное количество закрепившегося после стирки на поверхности полиамидных волокон металлофосфатного нетоксичного неорганического антипирена (вне зависимости от концентрации и состава раствора SnCl_2) характерно для материалов, обработанных 10% раствором HCl ; в несколько меньшей степени — 10% растворами H_2SO_4 и CH_3COOH , табл. В этих случаях на прошедшем стирку волокне сохраняется до 15 мас.% огнезащитной композиции, табл. Все другие растворы травления не обеспечивают сохранение замедлителя горения на полиамидном волокне более 5–8%. Наименьшее закрепление неорганического антипирена на поверхности полиамидных волокон происходит в случае щелочных растворов травления: 25% NH_3 и 10% KOH , табл.

Модификация состава коллоидных растворов SnCl_2 может увеличить закрепление антипирена на полиамиде до 20–24 мас.%, табл., однако при использовании тех же кислых растворов травления. Исследованием серии водных и спиртовых коллоидных растворов SnCl_2 с разными стабилизирующими добавками и сроками хранения было найдено, что при соблюдении оптимального диапазона размеров и концентрации коллоидных частиц в объеме раствора SnCl_2 (не менее 70% частиц имеют размеры 3–15 нм) количество закрепленного на полиамиде антипирена определяется составом раствора предварительного травления.

Таблица. Данные по привесу огнезащитного состава на полиамидном волокне с промежуточной активацией в этанольных растворах SnCl_2

Раствор травления	Δm после стирки, %	
	SnCl_2 без добавок	SnCl_2 с ЭДА
HCl 10%	15,9	23,97
H_2SO_4 10%	14,6	11,43
CH_3COOH 10%	12,93	19,91
Формалин 3%	2,46	3,45
Фенол 20 г/л	1,80	6,95
H_3PO_4 10%	6,47	4,65
NH_3 25%	0	4,10
KOH 10%	1,35	2,26

Таким образом, важнейшим условием успешности огнезащитной обработки полимерных волокон различной химической природы (полиамида и полиэфира) является создание на их поверхности при травлении значительного количества активных функциональных групп определенного состава, с которыми в дальнейшем происходит последовательное химическое взаимодействие компонентов раствора активации и неорганической огнезащитной композиции.

1. В.В. Богданова, О.И. Кобец // Исследование огнезащитной эффективности составов на основе аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов в зависимости от условий получения Журн. прикл. Химии. — 2014. — Т 87, Вып. 10. — С. 1385–1399.
2. Рева О.В., Богданова В.В., Шукело З.В. Химическая привязка огнезащитных композиций к полиэфирной матрице // Свиридовские чтения: Сб. статей. — Вып. 9. — Мн.: БГУ, 2013. — С. 158–168.
3. О.В. Рева, А.С. Лукьянов Определение оптимального метода создания наноструктурированных композиций на основе полиэфирных матриц, обладающих перманентной огнестойкостью // Вестник КИИ МЧС. — 2015. — № 2 (22). — С. 35–43.

МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРОВ ФУЛЛЕРЕНАМИ И ИХ КОМПЛЕКСАМИ С МЕТАЛЛАМИ

Э.М. Шпилевский¹, О.С. Филатова¹, Г. Шилагарди², Д. Улам-Оргих²

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
eshpilevsky@rambler.ru

²Национальный университет Монголии, г. Улан-Батор, Монголия, gshilagardi@yahoo.com

Успехи в синтезе новых проводящих полимеров, расширение области их применения как базового материала в оптоэлектронике, а также выявленные уникальные свойства молекул фуллеренов [1,2] вызвали интерес к изучению композитов, в которых полимеры используются в качестве матрицы внедрения фуллеренов [3]. В настоящей работе в качестве полимерных матриц использовались полистирол (ПС) и полиэтилен высокого давления (ПЭВД). Образцы ПС-С₆₀ и ПЭВД-С₆₀ получены методом полива пленок ПЭВД (марка ПЭВД-15803-020, производства РБ) в растворе С₆₀ в толуоле (1,4 мг/мл). Содержание фуллерена в пленке варьировалось путем изменения времени пропитки (0,5 и 3 ч). Для получения образцов ПС-С₆₀ использовались растворы полистирола в толуоле, фуллерена С₆₀ в толуоле, а ПЭВД-С₆₀ — в параксилоле.

Показано, что фуллерены С₆₀ введенные в полимерную матрицу активно взаимодействуют с окружающими молекулами матрицы, вызывая изменения физических свойств: механических, трибологических, оптических. Модифицированные ПС и ПЭВД показывают более высокую прочность, однако снижается пластичность, снижается коэффициент трения, увеличивается износостойкость. В оптических спектрах материалов происходит сдвиг границы пропускания, увеличение коэффициента пропускания, появление линий поглощения в диапазонах 220—400 нм. При низких концентрациях фуллеренов (до 2,5%) в матрице полистирола наблюдается увеличение коэффициента пропускания в УФ и видимом диапазонах, что указывает на упорядочивание структуры модифицированной матрицы.

Взаимодействие молекул фуллерена с полимерной матрицей в материалах ПЭВД-С₆₀ проявляется в сдвиге и изменении полуширины колебательных линий. Полимерная матрица оказывает сильное влияние на деформационные колебания (522 и 572 см⁻¹) молекулы С₆₀ (сдвиг в коротковолновую область, сужение линий). При сравнении спектров пропускания материалов ПЭВД-С₆₀ и чистого ПЭВД наблюдаются различия, вызванные наличием фуллерена в полимерной матрице. Положение линий ПЭВД в спектрах образцов ПЭВД-С₆₀ остается неизменным, однако для некоторых из них наблю-

дается изменение полуширины.

Показано, что введение фуллеренов и их комплексов с металлами (Ag, Ti) в полимеры приводит к существенному увеличению электрической проводимости, что обусловлено образованием неспаренных электронов, и свидетельствует о взаимодействии с полимерными цепочками матрицы металл-фуллереновых комплексов.

Установлено, что введение фуллеренов и их комплексов с металлами в полимеры (ПС и ПЭВД) приводит к изменению их физико-механических и оптических свойств. Свойства композитов зависят от долевого содержания введенных наночастиц и технологических условий приготовления (концентрации раствора, длительности пропитки, температуры сушки).

Установлено, что фуллерены влияют на условия надмолекулярного структурообразования ПС и ПЭВД, изменяя состояние полимера на поверхности частиц наполнителя. При повышенных концентрациях фуллеренов в полимерных матрицах формируются фуллеритовые кластеры, которые в свою очередь проявляют способность структурироваться в полимерной матрице.

Работа выполнена в рамках международного сотрудничества между Институтом тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси и Национальным университетом Монголии (код проекта Т19МН-001).

1. Гладченко С.В., Полоцкая Г.А., Грибанов А.В., Згонник В.Н. Исследование твердофазных композиций полистирол-фуллерен // Журнал технической физики — 2002. Т. 72. Вып. 1. С. 105—109.
2. Shpilevsky E.M., Shilagardi G., Tuvshintur P., Filatov S.A., Filatova O.S. Fullerenes as Components of substances and materials // Advanced Materials World Congress, 04—08 February 2018, Singapore: 2018. — P. 188—189 // www.vbripress.com/amwc17, DOI: 10.5185/amwc.2018.
3. Shpilevsky E.M., Filatov S.A., Karimov A.V., Kulish N.P. Carbon nanoparticles in new materials and technologies//New trends of development fundamental and applied physics^ problems, achievements and prospects. (Tashkent, Uzbekistan, 10—12 November 2016) Tashkent: TSU. 2016. Pp. 319—321.
4. Shpilevsky E., Penyazkov O., Filatov S., Shilagardi G., Tuvshintur P., Timur-Bator D., Ulan-Orgikh D. Modification of materials by carbon nanoparticles. Mongolian journal of Physics. Supp. 1, 2017. Pp. 20—23.

NON-CONTACT DIAGNOSTICS OF ELASTIC MODULI IN METALLIC COMPOSITES

V.V. Kozhushko, V.P. Sergienko

V.A. Belyi metal-polymer research institute of NAS of Belarus, Gomel, Belarus; vkozhushko@mpri.org.by

Elastic properties of composites can be evaluated by traditional ultrasonic methods while non-contact approach is desirable for industrial applications. The goal of the paper is to demonstrate some solutions based on the combination of laser excitation of probe ultrasonic pulses and their detection by means of custom-made electromagnetic acoustic transducers (EMATs) which are sensitive to field induced by elastic waves [1].

Optoacoustic transformation implies excitation of ultrasound due to energy absorption of nanosecond laser pulse. The absorption of laser energy occurs on the depth of tens nanometers in metals. The heat diffusion and thermal expansion induce ultrasonic pulses. The spectrum of ultrasound can be expressed from the product of spectrum of laser pulse envelope and transfer function which depends on the properties of the materials. The form and size of laser spot on the metal surface as well as the duration of laser pulse define the spectra and diagram for bulk elastic waves and the spectra for surface acoustic pulses.

Two experimental arrangements of moduli evaluations are considered. The first arrangement relates to the metallic specimens of semi-cylindrical geometry with the radius of 10 mm and the thickness of 5 mm. The radiation of Nd:YAG laser is focused by cylindrical lens into line along the axis of the cylinder as it is presented in the Fig. 1. Thus, the sources of acoustic pulses are localized at the axis. The sensitive element of the EMAT is induction coil with ferrite core. The size of the coil is $2.5 \times 2.5 \times 2 \text{ mm}^3$. The coils are mounted on the side surface on the printed circuit board and connected in the circuits of preamplifiers. The array of five EMATs is located at the periphery of the semi-cylindrical specimen.

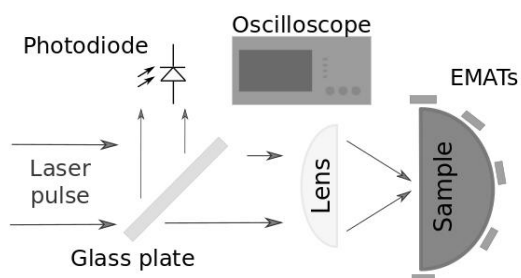


Fig. 1. Sketch of experimental arrangement for measurement of bulk and surface acoustic pulses by array of five EMATs based on ferrite core coils. The permanent magnetic field 0,25 T of ring shape NdFeB magnet is perpendicular to the plane of figure

The measurements were carried out by two channel oscilloscope, which was triggered by the signal of photodiode. The pulses propagate from the center to cylindrical surface where involve transient electromagnetic

field, which is mainly owing to magnetostriction in ferromagnets and eddy currents in metals. The time arrival to the surface was used for velocities and later moduli calculations. The obtained moduli for steel, copper, brass and aluminum agree with tabular values [2].

The second arrangement relates to the steel wires. The dispersion of ultrasound in such wave-guides is the main obstacle for velocities and moduli measurements. The Young's modulus defines the velocity of long-wave longitudinal modes in wire [3]. The excitation of low frequency mode can be carried out by unfocused laser spot of 5 mm diameter illuminating the side surface of the wires. The wires with diameters 0.225, 1.33, 1.4, 1.5, 1.6, and 1.83 mm were tested. The same ring shape NdFeB magnet with field of 0.25 T magnetized wires before measurements. Two EMATs based on the same principle as in previous arrangement were used. Coils were mounted on the distance of 23 mm in between. The ferrite cores touched the wire segment of 100 mm length. It is experimentally proved that induced long-wave modes propagate to the significant distance without dispersion but changing the phase to opposite one due to the reflection at the edges, please, see Fig.2. The measured velocities of low frequency modes are in the range $5.2 \pm 0.2 \text{ km/s}$, the Young's moduli are $210 \pm 3 \text{ GPa}$, that agrees with the tabular value for the bulk steel.

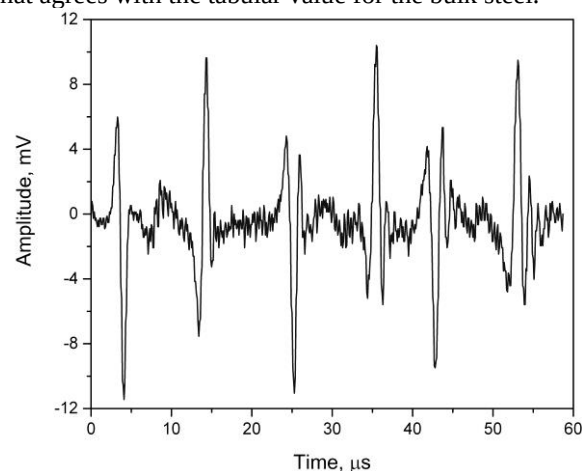


Fig. 2. Multiple reverberations of low frequency ultrasonic modes measured in 100 mm long wire of 1.6 mm diameter

1. Kozhushko V.V., Sergienko V.P., Mirchev Y.N., Alexiev A.R. Characterization of Elastic Properties of Metals and Composites by Laser-Induced Ultrasound. In: Barkanov E., Dumitrescu A., Parinov I. (eds) Non-destructive Testing and Repair of Pipelines. Engineering Materials. Springer, Cham — 2018
2. Kozhushko V. V., Sergienko V. P., Myshkovets V. N. Measurement of metal composites moduli by non-contact detection of optoacoustic pulses // Memoirs of the Faculty of Physics. — 2017. N 5.
3. Kolsky H. Stress Waves in Solids — Dover Publications, — 2003

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА, НАПОЛНЕННОГО КОРОТКИМ СТЕКЛОВОЛОКНОМ И НАНОГРАФИТОМ

В.В. Дубровский, В.Н. Адери́ха, В.А. Шаповалов, С.С. Песе́цкий

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

Введение. Наноразмерные аллотропные формы углерода, в первую очередь графен и углеродные нанотрубки, обладают уникальными прочностными, тепло- и электрофизическими характеристиками [1], а также являются эффективными модификаторами, влияющими на структуру и свойства полимеров [2, 3]. С практической точки зрения важно, что частицы многослойного графена по эффективности армирующего действия при наполнении полимера превосходят однослойный графен.

Улучшение технических характеристик композитов возможно с помощью гибридного наполнения, подразумевающего сочетание микроразмерных волокнистых и наноразмерных дисперсных наполнителей в полимерной матрице. Повышенный интерес к нему объясняется частыми проявлениями синергизма в изменении технических характеристик композитов на базе разнообразных связующих. Причинами проявления синергизма могут быть взаимовлияние наполнителей на процессы их диспергирования в полимерной матрице, что способствует повышению площади межфазной поверхности интенсификации межфазной адгезии и эффективности армирования вследствие этого. Межфазное взаимодействие на границе раздела нанографит-полимер зависит среди прочих факторов от химической структуры наночастиц, которая определяется технологией их получения.

Цель работы – сравнительные исследования структуры, реологических и прочностных свойств композитов ПЭТ, наполненных коротким СВ, а также нанографитов (нГ) различного типа: расширенного графита (РГ) и терморасширенного графита (ТРГ).

Материалы и методы. В работе использовали ПЭТ марки «Экопэт 84» (ОАО «ЭКОПЭТ», Россия) с характеристической вязкостью $[\eta] = 0,84$ дл/г и аппретированный алюмоборосиликатный стекловолокно марки ЕС13-2400Т-54С с диаметром моноволокон 13 мкм, выпускаемый ОАО «Полоцк-Стекловолокно». РГ производства ООО «Перспективные исследования и технологии» (г. Минск), был получен гидролизом интеркалята графита с натрием.

Для модифицирования материалов использовали жидкофазный модификатор гетероцепных термопластов марки МГТ-Ж (ТУ ВУ 40084698.265-2014), адгезионно-активный по отношению к ПЭТ, поверхности углеродных и стекловолоконных наполнителей, содержащий в своем составе ароматический диизоцианат, являющийся одновременно удлинителем цепи для полиэфиров.

Композиты получали методом реакционной

экструзии при использовании двухшнекового реактора-смесителя с односторонним вращением шнеков ($D = 35$ мм, $L/D = 40$) при температуре расплава 275°C и частоте вращения шнеков 350 об/мин. Предварительно в двухлопастном высокоскоростном смесителе смешивали часть МГТ-Ж и растворитель, затем добавляли РГ и перемешивали в течение 30 с, после чего этой смесью обрабатывали гранулят ПЭТ. Затем в вакуумируемой термокамере при 50°C удаляли растворитель и после этого добавляли остаток МГТ-Ж. О молекулярно-структурных изменениях в материалах судили по данным ДСК, рентгеновского структурного реологического анализов блочных образцов, а также расплавов и растворов материалов.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что: структура и механические свойства гибридных композитов ПЭТ/СВ/нГ в значительной степени зависят от технологии получения нГ.

Наличие в ТРГ кислородных мостиков связи между плоскостями графена затрудняет его диспергирование по сравнению с РГ, что подтверждается рентгенографическими исследованиями.

Наличие остаточных функциональных групп в структуре ТРГ вследствие кислотного интеркалирования и высокотемпературной обработки на воздухе интеркалята графита способствует интенсификации адгезионного взаимодействия ТРГ с ПЭТ, что приводит к повышению прочности при растяжении композитов ПЭТ/СВ/ТРГ по сравнению с ПЭТ/СВ/РГ при определенных степенях гибридного наполнения.

Проявления эффекта синергического повышения показателей механических свойств в гибридных композитах ПЭТ/СВ/нГ в значительной степени связано с улучшением степени диспергирования (расслаивания) наночастиц и снижением фрагментации стекловолокон при экструзионном компаундировании [4].

1. Choi W., Lahiri I., Seelaboyina R. and Kang Y. S. Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 35:52—71. — 2010
2. Kuilla T., Bhadra S., Yao D., Kim N.H., Bose S. and Lee J.H. Recent advances in graphene based polymer composites // Prog. Polym. Sci. — 2010, 35:1350—75
3. Du J. and Cheng H.M. The fabrication, properties, and uses of graphene/polymer composites // Macromol Chem Phys. — 2012, 213:1060—77
4. Dubrovsky V.V., Shapovalov V.A., Aderikha V.N. and Peseckii S.S. Effect of hybrid filling with short glass fibers and expanded graphite on structure, rheological and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) // Materials Today Communications. — 2018 (17), 15—23

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛИКОЛЯ

С.С. Строгонова¹, Н.В. Шевлик², С.С. Песецкий³, Л.А. Щербина⁴¹ОАО «Могилевхимволокно», Могилев, Беларусь²ОАО «ГИАП» Могилев, Беларусь³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь.⁴Могилевский государственный университет продовольствия Могилев, Беларусь; htvms@tyt.by

Введение. Полиэтилентерефталат (ПЭТ) является одним из важнейших технических полимеров, что проявляется в постоянном росте объемов его потребления. Основными областями применения ПЭТ являются волокна, пленки, полимерные контейнеры и другая тара для упаковки пищевых и непищевых товаров, разнообразные композиты технического назначения, в том числе получаемые с использованием полиэфирных отходов. Благодаря низкому водопоглощению, механической прочности и атмосферостойкости ПЭТ потенциально мог бы использоваться для получения светопрозрачных листовых материалов, альтернативных таковым из поликарбоната, акриловых полимеров, ненасыщенных полиэфирных смол и др. Недостатком ПЭТ, ограничивающим его применение в технологии листовых материалов, является способность к кристаллизации, ухудшающая деформационные и особенно светотехнические характеристики полиэфирных листов.

Этого недостатка лишен полимерный материал, который появился на рынке под названием полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТ-Г, PET-G). ПЭТ-Г представляет собой сложный сополиэфир на основе ТФК (ДМТ) и ЭГ, в котором часть звеньев ЭГ заменена на циклогександиметанол-1,4 (ЦГДМ-1,4). Это нарушает регулярность первичной структуры макромолекул и приводит к затруднению протекания процесса кристаллизации данного сополиэфира [1]. При полном замещении этиленгликоля в полимерной цепи на ЦГДМ-1,4 образуется полимер, который за рубежом обозначают как РСТ.

ПЭТ-Г отличается повышенной ударопрочностью (по данному показателю уступает только поликарбонату), высокой прозрачностью, отсутствием в составе вредных компонентов. ПЭТ-Г может применяться как самостоятельный продукт, так и в качестве одного из компонентов композиционных материалов с улучшенными физико-механическими показателями.

В отличие от ПЭТ, данный продукт более узкоспециализированный. Мировой рынок распределен между небольшим числом производителей, крупнейшими среди которых являются: Eastman Chemical (США), SK Chemical (Ю. Корея), Liaoyang Petrochemical Co. (Китай).

Цель настоящей работы — экспериментальное обоснование выбора рецептуры сырьевых компонентов и аддитивов для получения полиэтилентерефталатгликоля и установление зависимости количества связанного ЦГДМ-1,4 от соотношения компонентов в исходной реакционной смеси, изучение физико-химических свойств

и микроструктуры полученных сополиэфиров.

Методика. В исследованиях использованы следующие реактивы: диметилтерефталат (ОАО Могилевхимволокно); терефталевая кислота (ОАО Полиэф, РФ); этиленгликоль высшего сорта (Сибур, РФ); циклогександиметанол-1,4 (Sigma-Aldrich, США); ацетат марганца (Satyam Pharma-Chem PVT, Ltd, Индия); триоксид сурьмы (Polymet (Bolivia) S.A.); фосфорная кислота 85% (Hainan Huarong Chemical Co, Ltd, Китай); антиоксидант Irganox-1010 (BASF, ФРГ); смесевой антиоксидант В-561 (BASF); диоксид германия аморфный (Запорожье, Украина).

Синтез проводился с использованием стендовой лабораторной установки, моделирующей работу промышленного реактора идеального смешения периодического действия.

Результаты. Изучена зависимость основных характеристик ПЭТ-Г от количества ЦГДМ-1,4 в структуре сополиэфира. Количество ЦГДМ-1,4 в исходной рецептуре по отношению к ДМТ варьировали от 15 до 98% (мол.), а отношение общего количества диолов (ЦГДМ-1,4 + ЭГ) к ДМТ — от 1,5:1 до 3:1. Установлено, что оптимальное мольное соотношение гликолей (суммы ЭГ и ЦГДМ-1,4) к ДМТ должно выдерживаться в пределах от 2,1:1 до 2,3:1; мольное соотношение ЦГДМ-1,4 и ДМТ в исходной рецептуре должно быть (0,33÷0,36):1 (или 33-36 молей ЦГДМ-1,4 к 100 молям ДМТ). Дальнейшее увеличение доли ЦГДМ-1,4 (до 1:1) не приводит к существенному улучшению характеристик сополиэфира, при этом увеличивая его себестоимость. Определена степень уноса ЦГДМ-1,4 в процессе синтеза на стадиях переэтерификации и поликонденсации, которая составила на стадии поликонденсации до 3% (мол.) из 35% (мол.) в исходной рецептуре.

Изучены термические и структурные свойства экспериментальных образцов ПЭТ-Г. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии подтверждено отсутствие склонности данного полимера к кристаллизации, определена температура его стеклования. Методом спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на протонах и изотопах ¹³C получены данные для оценки распределения звеньев ЦГДМ-1,4 в макромолекулах ПЭТ-Г.

1. Шевлик, Н. В. Синтез и свойства аморфного светопрозрачного с-ПЭТ / Н. В. Шевлик, С. С. Строгонова, Л. Ю. Тычинская, В. Н. Коваль, Л. А. Щербина // Полимерные материалы и технологии. — 2016. — Т. 2, № 3. — С. 35—46.

СТРУКТУРНАЯ МОРФОЛОГИЯ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛИКОЛЯ

В.Н. Коваль¹, С.С. Строгонова², С.С. Песецкий¹

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, koval_mpr@tyt.by

²ОАО «Могилевхимволокно», Могилев, Беларусь

Введение. Полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТ-Г), являющийся аморфным насыщенным полиэфиром [1], находит все более широкое применение благодаря своей светопрозрачности, формовости в конечную продукцию по различным технологиям, прежде всего, для изготовления листовых изделий и продукции, получаемой методом раздувного формования. Благодаря особенностям молекулярной структуры, наличия полярных сложноэфирных групп, широкому диапазону температур вязкого течения, удовлетворительной термостабильности расплава ПЭТ-Г является перспективным компонентом для композитов, получаемых смешением его с другими полимерами в расплаве.

В докладе представлены результаты исследований совместимости ПЭТ-Г с аморфными поликарбонатом (ПК) и полиакрилонитрилбутадиенстиролом (АБС), а также кристаллизующимся ПЭТ и поли-ε-капролактоном (ПКЛ).

Методика. В работе использовали ПЭТ-Г промышленно выпускаемый фирмой SK Chemicals (Ю. Корея), а также ПК “Macrolon” (Bayer, ФРГ), АБС “Terluran GP-22” (Styrolution Croup, ФРГ), ПКЛ “Cара 6430” (Solvay, Бельгия). Исследуемые материалы получены смешением в расплаве в двухшнековом реакторе-смесителе с односторонним вращением шнеков. Образцы для испытаний изготавливали литьем под давлением. Показатели механических свойств определяли при испытаниях методами растяжения и ударного нагружения. Испытания при растяжении проводили на машине Instron 5657 (Великобритания). Реологическое поведение расплавов оценивали по значениям ПТР и вязкости (η), определяемым на приборе 5MPCA (ф. Ray-ran test equipment Ltd Великобритания). Исследования методом релаксационной спектроскопии (РС) проводили с использованием обратного крутильного маятника конструкции ИММС НАН Беларуси при частоте 1 Гц. Структурные исследования проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (микрокалориметр Diamond DSC, фирма «Perkin Elmer», США), о морфологии судили по данным СЭМ (электронный микроскоп Vega II LSH, Testan, Чехия).

Результаты. Установлено, что совместимость компонентов, межфазные взаимодействия в смесях, комплекс их реологических, релаксационных и механических свойств зависит от природы второго полимерного компонента и от концентрации ПЭТ-Г в смесях.

Для смесей ПЭТ-Г с кристаллизующимся ПЭТ 8200 показано, что кристаллизация последнего при

его концентрации ≤ 30 мас.% в присутствии изоцианатного удлинителя цепи полностью подавляется. ПЭТ и ПЭТ-Г по данным релаксационной спектроскопии совместимы при смешении в расплаве. Смеси ПЭТ-Г/ПЭТ по сравнению с ПЭТ-Г обладают улучшенными технико-экономическими характеристиками и высокой технологичностью при их переработке по экструзионным технологиям [2].

В смесях ПЭТ-Г/ПК компоненты взаимно растворимы во всем диапазоне варьирования их концентраций. Температура стеклования (T_g) находится в промежутке между значениями $T_{gПК} = 148,3$ °С и $T_{gПЭТ-Г} = 82,0$ °С подчиняется уравнению Фокса для однофазных смесей. Механические характеристики смесей ПЭТ-Г/ПК изменяются неаддитивно при варьировании концентрации компонентов: в смесях с преобладанием ПК наблюдается существенное повышение верхнего предела текучести по сравнению с аддитивными значениями, что по данным РС обусловлено интенсивными межмолекулярными взаимодействиями [3].

В смесях ПЭТ-Г/АБС независимо от их фазовой структуры совместимость компонентов отсутствует. Однако они характеризуются интенсивным межфазным взаимодействием, что, по данным СЭМ, приводит к формированию квазиоднородной морфологии и обеспечивает получение смесевых материалов по механической прочности, превышающей аддитивные значения.

ПЭТ-Г и ПКЛ по данным РС термодинамически несовместимы. Температура плавления ПКЛ равная примерно 58 °С практически не изменяется при концентрации ПЭТ-Г вплоть до образования им дисперсионной среды, а верхний предел текучести при этом возрастает до двух раз. Смеси ПЭТ-Г/ПКЛ перспективны для создания упрочненных легкоплавких материалов, прежде всего биомедицинского назначения.

1. 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
2. Коваль В. Н., Строгонова С.С., Песецкий С.С. Структурная морфология, релаксационные и механические свойства смесей полиэтилентерефталатгликоля с полиакрилонитрилбутадиенстиролом // Полимерные материалы и технологии. — 2018 (4), № 4, 37—45
3. Коваль В. Н., Строгонова С.С., Песецкий С.С. Смеси поликарбоната с полиэтилентерефталатгликолем: совместимость компонентов, реологические и механические свойства // Доклады НАН Беларуси. — 2019 (63), № 1, 121—128

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ В РАСПЛАВЕ ПОЛИБУТЕНА, СОПОЛИМЕРА ЭТИЛЕНА И ВЫСШИХ ОЛЕФИНОВ И ИХ СМЕСЕЙ

Ю.М. Кривогуз¹, О.А. Макаренко¹, А.М. Гулиев²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; yurikriv@tut.by

²Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, г. Сумгайыт, Азербайджан; nelly1949@yandex.ru

Введение. В последние десятилетия созданы технологии получения новых типов полимеров высших α -олефинов, в частности, полибутена-1 (ПБ), поли-4-метил-пентена-1, сополимеров этилена этилена с бутеном (СЭБ), гексеном (СЭГ) или октеном (СЭО), обладающих комплексом уникальных свойств. Новыми областями их применения могут быть функционализированные продукты, получаемые прививкой к макромолекулам полярных мономеров.

Основная цель работы — анализ прививки к макромолекулам ПБ, СЭГ, СЭО и смесям ПБ/СЭО (СЭГ) полярного мономера в расплаве, в процессе реакционной экструзии.

Методическая часть. В исследованиях использовали ПБ производства фирмы Lyondell Basel (Швейцария), а также СЭО производства DOW (США). Прививаемым мономером служила транс-этилен-1,2-дикарбоновая кислота (ТЭДК) производства «Комтекс», Россия. В качестве инициатора применяли 1,3-бис-(трет-бутилпероксиизопропил) бензол (далее Р-14), производство «Akzo Nobel» (Нидерланды). Процесс функционализации (прививки мономера) осуществляли в двухшнековом экструдере. В качестве параметров, характеризующих ход реакций прививки и побочных процессов, использовали эффективность прививки (α) и показатель текучести расплава (ПТР).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при фиксированной концентрации ТЭДК (1 мас.%) с увеличением содержания Р-14 от 0,05 до 0,3 мас.% эффективность прививки мономера к ПБ возрастает от 14,0 до 25%. В тоже время ПТР ПБ-п-ТЭДК в аналогичном концентрационном диапазоне пероксида увеличивается почти на два десятичных порядка по сравнению с исходным полимером. При постоянной концентрации Р-14 с увеличением содержания ТЭДК в реакционной смеси в пределах от 0,05 мас.% до 3 мас.%, степень прививки возрастает от 0,14 до 0,78 мас.%. В тоже время эффективность прививки, как показатель степени конверсии свободного мономера в привитую его часть, с ростом концентрации ТЭДК снижается. С целью уменьшения количества непривитой части мономера в объеме ПБ, при составлении рецептур реакционной смеси предпочтительно снижать концентрацию ТЭДК и увеличивать содержание пероксида.

С ростом частоты вращения шнека эффективности прививки ТЭДК к ПБ снижается. С ростом частоты вращения шнека наблюдается также снижение ПТР ПБ-п-ТЭДК, что свидетельствует о за-

медлении процесса деструкции макромолекул ПБ.

При увеличении концентрации пероксида Р-14 эффективность прививки ТЭДК к СЭБ и СЭО возрастает. При этом значения эффективности прививки несколько выше для СЭО, чем для СЭБ, что обусловливается наличием в структуре СЭО цепных макромолекул повышенного числа активных центров, по которым может присоединиться ТЭДК.

Исследованы особенности функционализации, в том числе селективность процесса, при прививке ТЭДК в расплаве смесей ПБ и ПП с сополимерами этилена и высших олефинов (СЭВО) — СЭГ и СЭО. Установлено, что ПБ и СЭВО в их смесях оказывают противоположное действие на эффективность прививки: повышение концентрации СЭВО способствует росту значений α , тогда как рост концентрации ПБ вызывает её снижение. Заметное влияние на эффективность прививки СЭВО проявляется, когда его концентрация в смеси составляет 50 мас.%. Изменение эффективности прививки в зависимости от состава смеси ПБ/СЭВО носит экстремальный характер с выраженным максимумом при изменении фазовой структуры.

Показано, что с увеличением содержания ПБ в смеси ПП/ПБ/СЭВО значения эффективности прививки монотонно снижаются. Добавление ПБ к смеси ПП/ПБ/СЭВО, в которой он формирует непрерывную фазу, может способствовать инициированию β -распада макромолекул полимерных компонентов. В тех смесях, в которых преобладают фазы СЭВО и ПП или все фазы полимерных компонентов непрерывны, наблюдается ингибирование β -распада макромолекул и рост значений эффективности прививки.

Анализ селективности прививки мономера и возможности регулирования побочных процессов показал, что в смесях ПБ/СЭВО свободнорадикальная прививка ТЭДК более интенсивно протекает в фазе СЭВО, в то время как фаза ПБ подвергается функционализации в меньшей степени.

Таким образом, за счет варьирования соотношения полимерных компонентов в смесях ПБ и ПП с сополимерами олефинов, можно получать функционализированные продукты с регулируемой эффективностью прививки и ПТР при замедлении побочного процесса β -распада макромолекул, что способствует расширению областей практического применения функционализированных продуктов.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Т18А3-001) и ФРН при Президенте Азербайджанской Республики (грант № EIF-BGM-3-BRFTF-2/2017-15/09/4-M-07)

CONTROLLING THE MORPHOLOGY OF ORGANIC FILM BY VARYING END GROUPS OF THE CHROMOPHORE

L. Ivanov¹, K. Grytsenko², P. Lytvyn², Yu. Slominskii³, V. Ksianzou⁴, S. Schrader⁴

¹Metal-Polymer Research Institute nam. V.A.Belyi, Gomel, Belarus

²Institute of Semiconductor Physics, Kyiv, Ukraine, d.grytsenko@gmail.com

³Institute of Organic Chemistry, Kyiv, Ukraine,

⁴Technical University of Applied Sciences, Wildau, Germany

Introduction Organic light emitting diodes, photovoltaic devices, optical memory, plasmonic, electrooptic represent just a short list of the applications of organic compounds in optoelectronic (OE). Small molecule (dye) or macromolecule (polymer) are the two types of the materials used in OE. The polymer has long exploitation time. Dye film can be made by both wet and vacuum deposition technologies, while polymer film can be deposited by wet method only with a few exceptions. Vacuum deposition is widely used for production of inorganic films for OE devices. Therefore, dye film deposition in vacuum is compatible with available technologies in semiconductor industry for production of multilayer systems. But many dyes producing discontinuous deposit which dependent on substrate material. Morphology of deposit plays crucial role in the film optical and electrical properties, so creation of the methods to control the morphology of the organic films is very important.

The aim of the research is to control the morphology of organic film on selected substrate by selection of end groups in the molecule.

Materials and methods Asymmetric fluorinated azo-dyes, merocyanines and sulphur-terminated dyes (STD) with different end groups were synthesized. Films were deposited in vacuum using thermally heated crucible. Morphology of the deposits was studied by atomic force microscope (AFM) Nanoscope IIIa Dimension 3000 in a tapping mode.

Results and discussion. The different core chromophores (responsible for the active function) have been modified by different end groups, which are responsible for the morphology of the deposit. Fig.1 shows the morphology of deposits. Depending on structure of fluorinated azo-dyes, films with various morphologies were produced on glass substrate. Changing end group in the STD molecules, the films with different morphologies were obtained on glass, polytetrafluorethylene (PTFE) and gold surfaces. The change of dye chemical structure and substrate type resulted in different growth kinetics and thermodynamics. The island, uniform crystalline or amorphous and nano-structured morphologies were obtained. Depending on deposition conditions Volmer-Weber, (island formation), Frank-van der Merwe (layer-by-layer), and Stranski-Krastanov (layer-plus-island) growth modes were found, e.g. different morphologies of the same dye but deposited on various substrates have been observed by AFM. The most of STD produced smooth film on gold and nan-

wires or no deposit at all on PTFE or on glass substrates. STD 4 formed dendrites on Au surface, but almost no deposit on PTFE and drops with diameter about tens nanometers on glass. The dendrites indicate that molecules have high mobility on the Au surface and dye-dye interaction was stronger than interaction of the dye with Au. STD 5 formed separated islands on glass, continuous rough (height 100 nm) film on Au and nanowires (1 μm x 150 nm) on PTFE surface.

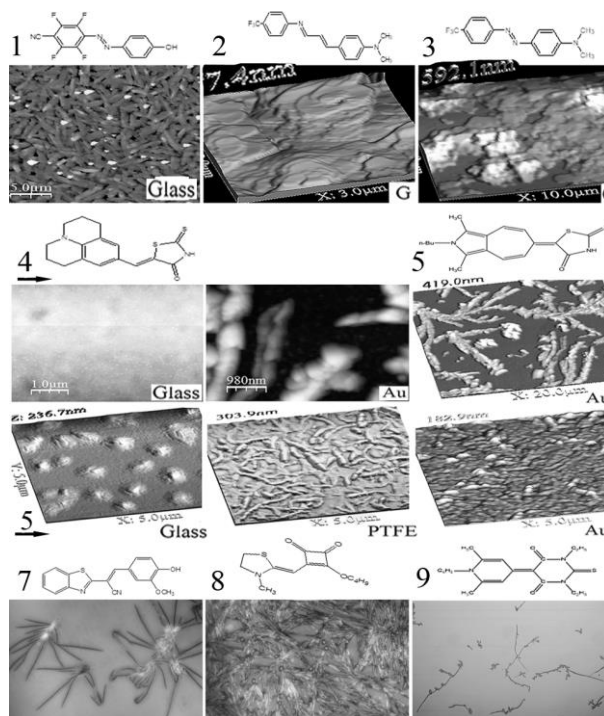


Fig. 1. Morphology of organic films. 1-3 azo-dyes on glass, 4 upper row and 5 lower row — STD on glass, PTFE and Au; 7-9 dyes producing nanowires

Several compounds formed nanowires in dependence on substrate material and deposition conditions, in some cases up to several centimeters long. Mostly the wire-like morphology was formed by molecules containing thiophene group in the molecule.

Conclusions: Modification of chromophore with various end groups led to formation of the different morphologies on different substrates. Attaching end groups in a predefined way, it is possible to produce films with the desired morphology on the surface of the selected substrate.

ВЛИЯНИЕ ТОПОГРАФИИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЫЖ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СКОЛЬЖЕНИЯ

А.Л. Богданов, В.Г. Кудрицкий

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

Качество скольжения лыж определяет скорость движения лыжника и оказывает значительное влияние на его результат. Борьба за улучшения качества скольжения всегда носила принципиальный характер, особенно на соревнованиях мирового уровня.

С одной стороны качество скольжения лыж зависит от применяемой смазки — лыжных мазей и парафинов, а с другой от так называемой структуры скользящей поверхности.

При движении скользящей поверхности лыжи (СПЛ) по снегу, она разогревается вследствие трения о снежные кристаллы. В результате снег плавится и возникает тонкая пленка воды, что обеспечивает хорошее скольжение лыжи.

Однако следует отметить, что в очень холодную погоду при сухом снеге водяная прослойка может оказаться слишком тонкой, в этом случае она не обеспечит хорошее скольжение. А в случае теплой погоды и при влажном снеге воды образуется слишком много, возникает так называемый «подсос», и сила сопротивления увеличивается, а скорость скольжения уменьшается.

Для нейтрализации этого явления, на скользящую поверхность лыжи наносится так называемая «структура» — система бороздок, схожая с протектором на автомобильных покрышках. Они способствуют отводу излишней воды, уменьшая тем самым тормозящее действие «подсоса» [1].

Цель

Исследование влияния топографии скользящей поверхности лыжи на эффективность скольжения в условиях широкого температурного режима.

Материалы и методы исследования

Объект исследования образцы скользящей поверхности лыж на основе полиэтилена высокой плотности, на которую посредством накаток нанесли структуру.

Полученные образцы испытывали на эффективность скольжения на лабораторном стенде в диапазоне температур от -10 до $+5$ °C.

Результаты и их обсуждение

На сегодняшний день исходная механическая обработка СПЛ осуществляется машинной шлифовкой лыж, т.н. штайншлифт. На сегодняшний день штайншлифт — это общепринятый способ обработки СПЛ, производители лыж обычно применяют штайншлифт для выравнивания поверхности. Однако оборудование для штайншлифта достаточно дорогостоящее и доступно ограниченному количеству лыжников. В связи с чем широкое распространение

также получил ручной способ нанесения структуры посредством металлических накаток, которые позволяют нанести различные виды структуры [2, 3].

Также для выравнивания топографии СПЛ применяют специализированные парафины. Наплавленный парафин заполняет углубления на СПЛ и тем самым выравнивает топографию. Однако следует отметить, что при наличии подходящей структуры на СПЛ нанесение парафина не обязательно, к тому же парафин зачастую стирается еще на начальных участках пути и далее не обеспечивает необходимой эффективности.

Примеры исследуемых поверхностей приведены (на рис. 1), показаны V-образные структуры различного размера с шагом бороздок 1 мм и 0.5 мм.

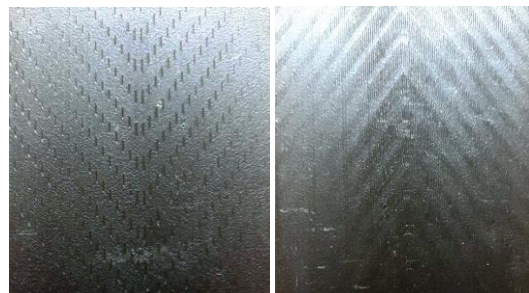


Рис. 1. Образцы скользящей поверхности лыж V-образного типа, полученные при помощи накаток.

По результатам исследований установлено, что наибольшая эффективность скольжения образцов лыж достигается: для холодной погоды и сухого снега при расстоянии между бороздками структуры 0,5—0,7 мм и менее; при более высоких температурах, для более теплого и влажного снега — более 0,5—1 мм.

Расстояние между бороздками должно исключать забивание их снегом, т.е. зависит от размера снежных кристаллов.

1. Mathia, T.G., Zahouani H., and Midol A. Topography, wear and slidin functions of skis. Int. J. Machine Tools Manufact, 1992. 32: p. 263—266
2. Кузьмин Л.Н. Поверхностное трение скольжения лыж: природа, пути и методы их улучшения / Л.Н. Кузьмин // Всерос. науч.-практ. конф. «Современная система спортивной подготовки в биатлоне» 24—25 апреля 2012 года, г. Омск
3. Панжинский Э.Н. Подготовка лыж / Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Тихоокеанский гос. ун-т". Хабаровск, 2007.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ЗАРЯД
ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОКВ.А. Гольдаде^{1,2}, М.А. Коваленко²¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
victor.goldade@gmail.com²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

Появление электретных свойств у полимеров связано с дипольной поляризацией, смещением зарядов внутри молекул или доменных структур, образованием пространственного или поверхностного зарядов. Соответственно и различные методы исследования позволяют изучать объемный и поверхностный заряд электретов. Специфический вид электретов — фотоэлектреты, получаемые в результате облучения полимеров электромагнитным излучением с различной длиной волны.

В настоящей работе исследование электретных свойств полимеров и полимерных композитов, подвергнутых лазерному облучению, осуществляли методом электретно-термического анализа и методом компенсации поля поверхностного заряда с помощью вибрирующего электрода [1].

Материалы и методы. Образцы пленок изготавливали горячим прессованием из порошкообразного полиэтилена высокого давления (ПЭВД) и наполнителя — монтмориллонита (ММ) с размером частиц 20 нм. Содержание наполнителя составляло 0, 2 и 5 мас.%. Для формирования в пленках электретного состояния использовали твердотельный лазер на алюмоиттриевом гранате с длиной волны 1,06 мкм. Размер пятна облучения на образце составлял 2 мм. Облучение лазером производили в импульсном режиме путем сканирования лазерного луча по всей поверхности образца исследуемой плёнки. Электретные свойства пленок оценивали по спектрам термостимулированных токов (ТСТ) образцов сформированных фотоэлектретов, и по величине эффективной поверхностной плотности заряда ($\sigma_{\text{эфф}}$), измеренной методом вибрирующего электрода.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 приведены спектры ТСТ образцов. Первый пик ТСТ в области температур 70–80 °С (рис. 1, а) соответствует релаксации технологического заряда, сосредоточенного в основном в аморфной части ПЭВД. Второй пик при 105 °С соответствует температуре плавления кристаллической фазы полиэтилена и обусловлен носителями заряда противоположного знака. Увеличение содержания ММ приводит к росту абсолютных значений токов, что скорее всего обусловлено поляризацией Максвелла-Вагнера на границе раздела наполнитель-связующее.

Лазерная обработка (ЛО) образцов резко меняет картину релаксации зарядов (рис. 1, б). Низкотемпературный пик исчезает, а высокотемпературный по абсолютной величине возрастает на 2–3 порядка. По-видимому, технологический заряд полно-

стью нейтрализуется зарядом, наведенным лазерным излучением, и на фоне последнего становится малозаметным. Эти соображения подтверждаются результатами исследования эффективной поверхностной плотности заряда образцов (рис. 2). Наибольшей плотностью заряда обладают образцы, наполненные 5% ММ и подвергнутые ЛО.

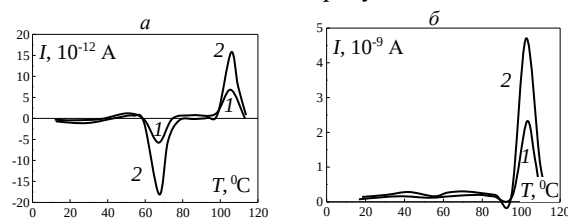


Рис. 1. Спектры ТСТ пленок ПЭВД до (а) и после (б) лазерного облучения. Содержание ММ в образцах, мас.‰: 2,0 (кривые 1) и 5,0 (кривые 2)

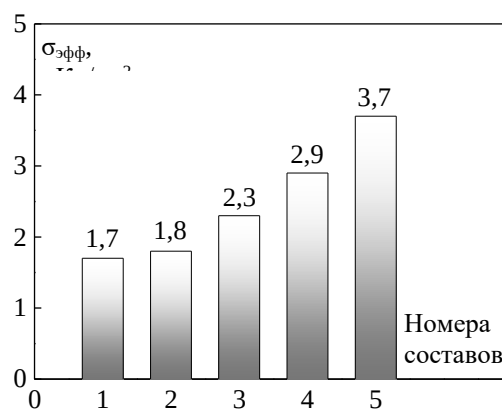


Рис. 2. Зависимость эффективной поверхностной плотности заряда образцов ПЭВД от содержания ММ и лазерной обработки: 1 — исходная пленка, 2 — наполненная 2% без ЛО, 3 — наполненная 5% без ЛО, 4 — наполненная 2% + ЛО, 5 — наполненная 5% + ЛО

Заключение. Выявленные закономерности могут быть обусловлены физико-химическими процессами в системе «излучение — воздух — поверхность диэлектрика». Транспорт образованных ионов разных знаков к поверхности пленки приводят к взаимодействию последних с носителями технологического электретного заряда. Поэтому лазерное воздействие можно применять для целевого регулирования электретного состояния в полимерах.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма ПМТ 6.52.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОГО СТАРЕНИЯ НА ТРЕКИНГОСТОЙКОСТЬ САМОЗАТУХАЮЩЕГО ПА6

А.А. Давыдов

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

Введение. Использование безгалогенных и безфосфорных антипиренов на базе синергических смесей соединений сим-триамина позволяет получать огнестойкие композиты с высшей категорией стойкости к горению [1]. Огнестойкие полиамидные композиты могут использоваться в изделиях, эксплуатирующихся на воздухе при повышенной температуре. Поскольку алифатические полиамиды относительно быстро стареют в этих условиях, то представляет научный и прикладной интерес изучить изменение огне- и трекингоустойчивости самозатухающих композитов при их термоокислительном старении.

Цель работы — изучение влияния состава термоокислительного старения огнестойкого ПА6 на изменение его стойкости к горению, трекингоустойчивости, а также механические характеристики композитов.

Материалы, методы получения и испытания образцов. Базовыми материалами служили ПА6 для контакта с пищевыми продуктами, а также стеклонаполненный ПА6 марки Гроднамид СВ-30П производства ОАО «Гродно Азот». В качестве антипиренов (АП) использовали для ПА6 синергические смеси производных сим-триамина с нанодисперсными металлосодержащими 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. Для огнестойкого стеклоармированного ПА6 (ПА6/СВ-30/АП) в качестве АП использована синергическая смесь на основе декабромдифенилоксида.

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 35 мм; 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 80x10x4 мм для определения категории стойкости к горению (ГОСТ 28157), ударной вязкости по Шарпи (ГОСТ 4647); дисков диаметром 50 мм и толщиной 3 мм для определения сравнительного индекса трекингоустойчивости по СТБ ИЕС 60112. Старение готовых образцов проводили в термокамере со свободной циркуляцией воздуха при T = 150 °C.

Результаты и их обсуждение. Изменение показателей свойств огнестойкого ПА6 в зависимости от времени старения полиамидных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение показателей, характеризующих огне- и трекингоустойчивость материалов, а также их механические свойства при термоокислении (T = 150 °C)

Материал	Длительность старения, ч	КГ	I, В	σ_p , МПа	a, кДж/м ²
ПА6	0	горит	600	65	н/р (7,6)*
	48	горит	600	42	3,8
	72	горит	600	31	3,1
ПА6/АП	0	ПВ-2	600	50	39
	48	ПВ-0	600	33	4,1
	72	ПВ-0	600	32	3,0
ПА6/СВ/А П	0	ПВ-0	250	95	48,0
	48	ПВ-0	225	107	43,3
	72	ПВ-0	200	116	38,2

Примечание. КГ — категория стойкости к горению, I — контрольный индекс трекингоустойчивости, σ_p — прочность при разрыве, a — ударная вязкость по Шарпи (без надреза).

Как видно из табл. 1, термоокислительное старение образцов оказывает сильное влияние на уровень значений исследуемых показателей. Важно отметить, что стойкость к горению при старении не только не ухудшается, но даже происходит улучшение огнестойкости. Так композит ПА6/АП, имеющий категорию стойкости к горению ПВ-2 после 2-х суток термоокисления при 150 °C характеризуется высшей категорией стойкости к горению ПВ-0. Термоокисление ПА6/АП не влияет на его трекингоустойчивость. В отличие от этого контрольный индекс трекингоустойчивости стеклоармированного композита ПА6/СВ-30/АП в процессе старения снижается с 250 В до 200 В. При повышении термоокислительного старения исходного и огнестойкого ПА6 наблюдается резкое ухудшение их механических характеристик. Стеклоармированный композит, наоборот, характеризуется некоторым упрочнением при испытаниях методом растяжения и незначительным ухудшением ударной вязкости. Полученные данные свидетельствуют о необходимости проведения углубленных исследований, направленных на изучение поведения огнестойких ПА композитов при старении в воздушной атмосфере.

1. Давыдов А. А. Огне- и трекингоустойчивость полиамида 6, содержащего антипиренирующие добавки на основе соединений сим-триамина // Полимерные материалы и технологии. — 2018. (4), № 1, 67—74.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПНЕВМОЭКСТРУЗИОННЫХ ВОЛОКНАХ

С.В. Зотов¹, В.А. Гольдаде¹, Н.С. Винидиктова¹,
В.И. Жукалов², А.Г. Кравцов³, Ж.В. Кадолич⁴

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, zotov-1969@mail.ru

²Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Гомель, Беларусь

³Государственное научное техническое учреждение «Центр по ядерной и радиационной безопасности», Минск, Беларусь

⁴Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Беларусь

Введение. Полученные методом пневмоэкструзии (melt blowing) полимерные волокнистые материалы обладают уникальным сочетанием свойств, благодаря чему применяются при фильтрации многофазных сред от загрязнений. К настоящему времени достигнут некоторый предел технологических возможностей по обеспечению уровня свойств этих материалов. Поэтому актуально модифицирование волокон с тем, чтобы повысить эксплуатационные характеристики волокнистых фильтров, сорбентов и других технических изделий.

Цель. Оценка взаимосвязи поляризационных эффектов в пневмоэкструзионных волокнах.

Материалы. Образцы волокон, полученные пневмоэкструзионным методом из расплава полипропилена — в нативном виде, модифицированные в отрицательном и положительном коронном разряде напряженностью 25 кВ/см, а также дополнительно обработанные в низкотемпературной кислородной плазме тлеющего разряда с частотой 35 кГц.

Методики. Метод пневмоэкструзионного формирования волокон из расплавов полимеров, метод электротно-термического анализа с получением спектров термостимулированных токов.

Результаты и обсуждение. Известно существование в полимерных пневмоэкструзионных материалах явления электрической поляризации за счет интенсивного термоокисления формирующихся волокон. Обработка последних в физических полях усиливает это явление [1], особенно в окисленном поверхностном слое волокон. Спектры термостимулированных токов (рис. 1) иллюстрируют специфическую картину деполяризации. В температурном диапазоне до 100 °С токовых пиков, отвечающих высвобождению заряда, не наблюдается. Однако после 100 °С происходит медленный, слегка ступенчатый рост тока отрицательной полярности, который имеет максимум величиной 5—7 пА около 150 °С, т.е. на 15 °С ниже температуры плавления кристаллической фазы полипропилена, пик которого (близкий по интенсивности) фиксируется при 165 °С. Можно выделить последовательные процессы:

- 1) ступенчатая релаксация зарядов, связанных с окисленными группами поверхностного слоя;
- 2) экстремальное завершение этой релаксации;
- 3) релаксация всех оставшихся зарядов.

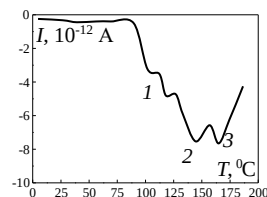


Рис. 1. Области деполяризации (1, 2 и 3) на характерном спектре термостимулированного тока волокон из полипропилена

Спектры волокон, подвергнутых разным видам модифицирования, демонстрируют отличия в количестве локальных экстремумов процесса (1) и в сравнительной величине пиков (2) и (3). Тем самым, модифицирование специфически влияет на перераспределение зарядов в окисленном поверхностном слое волокон. Электретный заряд, существующий в различных формах, будет особым образом реагировать на любые поляризующиеся (диэлектрические) объекты. Это создает предпосылки для формирования в волокнисто-пористом материале многоуровневой фильтрующе-сорбирующей среды.

Заключение. Очевидна практическая значимость применения подобных материалов:

- при решении задач МЧС (сорбция некоторых фракций нефти);
- в инженерной экологии (фильтрация жидкостей от загрязнений диэлектрической природы) [1];
- при мероприятиях по радиационной безопасности (фильтрация воздуха от содержащей радиоактивные частицы ионизированной пыли);
- в пищевой индустрии (очистка растительных масел, являющихся диэлектрическими средами с поляризованными компонентами) [2];
- в медицине и биологии (целевое разделение биологических жидкостей, содержащих диэлектрические и/или электретные компоненты).

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма ПМТ 6.52.

1. Кравцов, А.Г. Электрические и магнитные поля в полимерных волокнистых фильтроматериалах для тонкой очистки многофазных сред: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.Г. Кравцов; ИММС НАН Беларуси. — Гомель, 2007. — 44 с.
2. Кадолич Ж.В., Зотов С.В. Иллюстрация возможностей метода электротно-термического анализа при исследовании растительных масел // Стандартизация. — 2018, № 4, 61—68.

СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВЕЗУВИАНА И СОПОЛИМЕРОВ ЭТИЛЕНА С ГЕКСЕНОМ

Н.Т. Кахраманов, И.В. Байрамова

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

Сополимер этилена с гексеном (СЭГ) на самом деле является одним из разновидностей линейного полиэтилена низкой плотности ЛПЭНП, который успешно применяется для получения на его основе преимущественно экструзионных и литевых изделий. Целью данной работы являлось исследование совместного влияния природного наполнителя (везувиана) и структурообразователя (TiO_2) на основные физико-механические характеристики нанокompозитов на основе СЭГ. Увеличение концентрации наночастиц везувиана (размер наночастиц — 17—110 нм) в составе СЭГ до 2.0 мас.% сопровождается повышением разрушающего напряжения от 37.4 до 39.3 МПа и относительного удлинения от 810 до 820%. Максимальное значение разрушающего напряжения достигается при 5.0 мас.% содержании наночастиц везувиана и составляет 41.5 МПа. Дальнейшее повышение концентрации наполнителя свыше 5.0%масс. приводит к закономерному снижению разрушающего напряжения. При этом, модуль упругости при изгибе постоянно увеличивается с повышением концентрации везувиана.

С увеличением концентрации наполнителя до 20 мас.% величина этого показателя постоянно повышается от 5.1 до 13.2 г/10 мин. Только при 30 мас.% содержании везувиана величина ПТР несколько снижается до 11.3 г/10 мин. И все равно величина ПТР остается намного выше, чем у исходной полимерной матрицы. Такое увеличение ПТР противоречит общепринятым представлениям, согласно которым с увеличением концентрации наполнителя, как правило, вязкость расплава возрастает, а текучесть расплава снижается. Складывается такое впечатление, что везувиан ведет себя, не только как природный минеральный наполнитель, но и как агент смазки. Рентгенфазовый анализ структуры и состава везувиана показал, что в ней содержится 12.5 мас.% каолинита или нано-глины, для которой характерна слоистая структура. Согласно имеющимся литературным данным в межслоевом пространстве наноглины могут содержаться полярные обменные жидкости, глицерин или поверхностно активные вещества, которые в процессе переработки на вальцах могут мигрировать в полимерную матрицу с последующим улучшением текучести расплава [1, 2]. Механизм этого процесса заключается в том, что в процессе смешения и термомеханическо-

го воздействия на расплав нанокompозита макроцепи полимерной матрицы интеркалируют в межслоевое пространство нано-глины, в результате чего происходит их разрушение (экслоирование) на еще более мелкие частицы, с последующим выделением вышеуказанных жидкостей в дисперсную фазу [3, 4].

В процессе применения нанокompозитов на основе СЭГ и везувиана могут возникнуть проблемы, связанные с необходимостью установлением влияния размера частиц наполнителя на их основные эксплуатационные свойства. В этой связи, было изучено влияние размера частиц везувиана в пределах от наноразмерного до 4 мк на свойства композитов. Из сопоставительного анализа было найдено, что с увеличением размера частиц везувиана наблюдается общая тенденция к снижению их деформационно-прочностных характеристик. В отличие от нанокompозитов максимальные значения разрушающего напряжения достигается при 10%масс. наполнении везувиана. Причем, с увеличением концентрации везувиана влияние размера его частиц на свойства становится еще более заметным. Повидимому, введение грубодисперсных частиц везувиана в состав полимерной матрицы будет способствовать разрыхлению кристаллической структуры СЭГ и тем самым ухудшению их деформационно-прочностных свойств и относительного удлинения.

Таким образом, с учетом вышеизложенного можно констатировать, что использование природного минерала Азербайджана — везувиана в качестве наполнителя полиолефинов, в частности сополимера этилена с гексеном, открывает перспективную возможность получения на их основе нанокompозитов с улучшенными деформационно-прочностными характеристиками.

1. Ермаков С.Н., Кербер М.Л., Кравченко Т.П. Химическая модификация и смешение полимеров при реакционной экструзии // Пластические массы. 2007. № 10. с. 32—41.
2. Кахраманов Н.Т., Арзуманова Н.Б., Осипчик В.С. Реологические свойства композитных материалов на основе random полипропилена и везувиана. // Перспективные материалы. // Перспективные материалы. 2017, № 4, с. 35—47.
3. Кодолов В.И., Хохлаков Н.В., Кузнецов А.П. К вопросу о механизме влияния наноструктур на структурно изменяющуюся среду при формировании «интеллектуальных» композитов // Нанотехника. 2006. № 3(7). с. 27—35.
4. URL <http://www.miningenc.ru/m/montmorillonit/>

ФРОНТАЛЬНАЯ СОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ АКРИЛАМИДА С 2-АКРИЛАМИДО-2-МЕТИЛПРОПАНСУЛЬФОНАТОМ НАТРИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА

Ю.В. Василевская¹, Е.О. Соломевич¹, Е.В. Гринюк¹, Л.П. Круль²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, krul@bsu.by

В настоящее время метод фронтальной полимеризации (ФП) является перспективным способом получения сополимеров акриламида (АА) [1]. Сополимеризация АА с его ионогенными производными позволяет получать широкий спектр полимеров и ПЭГГ на их основе, применяющихся в различных областях техники, медицины, фармацевтической и нефтедобывающей промышленности [2].

При проведении процесса ФП в полупромышленных и промышленных масштабах с целью достижения высокой производительности потребуются изготовление трубчатого реактора большого объема. Наиболее оптимальной формой такого трубчатого реактора будет змеевиковая. В реакторе такой формы полимеризационный фронт будет распространяться как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. При ФП в жидких мономерах или их растворах существенное влияние на протекание процесса оказывает конвективный тепло- и массоперенос, который может привести к дестабилизации фронта и к затуханию самопроизвольного процесса ФП. Наиболее неблагоприятное влияние конвекции будет наблюдаться при вертикальном восходящем направлении движения фронта, наименьшее же конвекция будет оказывать в вертикальном нисходящем направлении.

Цель настоящей работы заключалась в изучении процесса ФП АА с 2-акриламидо-2-метилпропансульфонатом натрия (АМПСNa) в трубчатых стеклянных реакторах сложной формы.

Материалы и методы. При выполнении работы использовались следующие соединения: АА и АМПС производства фирмы «Sigma-Aldrich»; персульфат аммония (ПСА) по ГОСТ 20478-75 изм. 1, 2, 3 марки х.ч. без предварительной очистки. В качестве реакционной среды использовался водный раствор промышленного полиакриламида производства компании SNF Floerger (Франция) марки FP — 307 с концентрацией полимера 0,5%. АМПСNa получали путем нейтрализации АМПС эквивалентным количеством гидроксида натрия непосредственной в исходной реакционной смеси. С целью предотвращения спонтанной полимеризации до начала ФП в исходный раствор вносили гидрохинон в концентрации 0,5 г/л. Все реакции проводились в запаянных с одного конца стеклянных трубках (рис. 1) с внутренним диаметром 5 мм. Реакции инициировались путем точечного нагрева верхних слоев рас-

твора мономеров в трубке. Скорость распространения фронта определяли измерением расстояния, пройденного фронтом за определенный временной интервал. Температуры полимеризационных фронтов измерялись при помощи термомпары К-типа, погруженной в раствор мономеров.



Рис. 1. Схематичное изображение трубчатых реакторов, в которых проводилась эксперименты по ФП

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены значения температуры и скорости распространения фронта в горизонтальном направлении в зависимости от концентрации ПСА.

Таблица 1. Макрокинетические параметры фронта при сополимеризации АА с АМПСNa

Концентрация инициатора, %	Скорость фронта, см/мин	Температура фронта, °С
0,15	—	—
0,20	2,28	135
0,30	2,52	133
0,40	2,58	134
0,50	2,73	137
1,00	2,78	138

Из табл. 1 видно, что минимальная концентрация инициатора, необходимая для осуществления фронтальной сополимеризации АА с АМПСNa в использованных в работе реакторах составляет 0,2%. При концентрации ПСА 0,15% происходило затухание фронта на изгибах реактора, что связано, по-видимому, с возрастанием потерь тепла в окружающую среду. Также из табл. 1 видно, что скорости фронтов немного возрастают с увеличением концентрации инициатора, а их температуры остаются практически неизменными.

- Гринюк Е. В., Круль Л. П. Фронтальная сополимеризация акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислотой и с акрилатом натрия в водных растворах // Полимерные материалы и технологии. — 2016 (2), № 1, 48—53
- Куренко, В.Ф. Водорастворимые полимеры акриламида // Соросовский образовательный журнал. — 1997, № 5, 48—53

МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ МАКРОМОЛЕКУЛ С СОЛЯМИ 3-D МЕТАЛЛОВ

Е.Ю. Бобкова, В.С. Васильева, М.А. Ксенофонов, Л.Е. Островская,
В.В. Понарядов, М.Б. Шундалов

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

Особенности химического строения полимерной матрицы сорбента Пенопурм® и геометрия газоструктурных элементов обеспечивают его способность поглощать из водных сред растворенных, эмульгированных и поверхностных углеводов.

В последние годы с использованием теории функционала плотности (DFT) массовое распространение получили квантово-химические расчеты молекулярных структур, колебательных частот в ИК и КР спектрах.

Метод DFT обеспечивает высокую точность результатов, является более экономичен по временным и ресурсным затратам, чем расчеты *ab initio*, а его применение наиболее эффективно при исследовании структуры и спектров молекул с большим числом атомов.

Для выявления особенностей механизма сорбции 3-d металлов макромолекулами пенополиуретана нами проведен квантово-химический расчет взаимодействия этих солей с уретановой и амидной группами, обладающими наиболее высокой энергией когезии.

При расчетах были использованы: модель структурного фрагмента макромолекулы полиуретана, в качестве которой служила молекула метилфенилкарбамата (МФК); модель комплекса I — молекула МФК при координации хлорида цинка к атому азота уретановой группы; модель комплекса II — молекула МФК при координации хлорида цинка к атому кислорода карбонильной группы (рис. 1, 2).

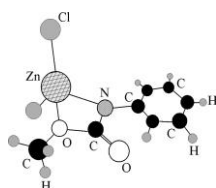


Рис. 1. Комплекс I (координация соли цинка с атомом азота уретановой группы)

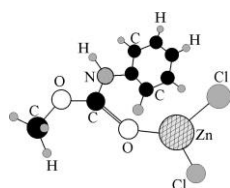


Рис. 2. Комплекс II (координация соли цинка с атомом кислорода карбонильной группы)

Анализ рассчитанных структурных моделей и колебательных ИК спектров показал, что извлечение солей 3-d металлов из водных сред осуществляется через образование координационных связей ионов 3-d металлов с азотом уретановых, а так же карбонилами мочевиновых групп и с атомами кисло-

рода концевых гидроксильных групп макромолекул полиуретана.

С целью повышения сорбционной емкости сорбента Пенопурм® путем увеличения содержания мочевиновых групп в полиуретане были получены образцы композитов с концентрацией мочевины 20 ÷ 50 мас. %.

Анализ ИК спектров композитов показал, что при увеличении концентрации мочевины в композите растет интенсивность полос 1652, 1615, 1557, 1472, 1457 см⁻¹ (рис. 3).

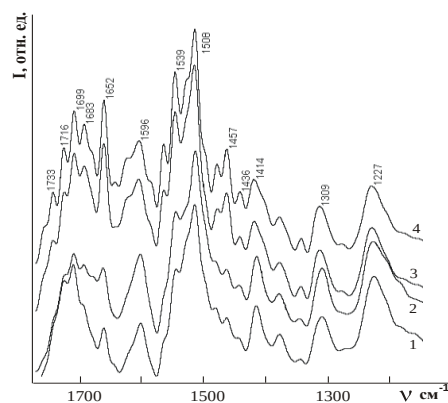


Рис. 3. ИК спектры: 1 — исходный ППУ; композиты ППУ при концентрации мочевины, мас. %: 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50

Изменение соотношения интенсивности полосы при 1652 см⁻¹ к интенсивности стандартной при 1508 см⁻¹ составило для образцов 1, 2, 3, 4 0,24; 0,48; 0,67; 0,69 соответственно. Следует отметить, что для образцов 3 и 4 данные значения соотношений интенсивностей почти не отличаются, что свидетельствует о достижении насыщения при встраивании мочевиновых групп в макромолекулу пенополиуретана.

Кроме того, в композитах с увеличением концентрации мочевины до 50 мас. %, изменяются физико-механические свойства полиуретана, так наряду с ростом прочности композита при изгибе увеличивается модуль упругости.

Таким образом, повышение концентрации мочевиновых групп в пенополиуретановых макромолекулах позволяет существенно повысить сорбцию солей 3-d металлов модифицированным композитом.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИАМИДА-6 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УФ ИЗЛУЧЕНИЕМ

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

Белорусский национальный технический университет; nil_pt@bntu.by

Сканирующая модификация зонда Кельвина [1] применена для исследования параметров распределения поверхностного потенциала полиамида-6 (ПА-6) при разряджении (диэлектризации) ультрафиолетовым (УФ) излучением спектра 320—360 нм.

Методы контактной разности потенциалов (КРП) традиционно применяют для анализа состояния поверхностей металлов и сплавов по относительным значениям работы выхода электрона, а также ряда связанных параметров в случае полупроводников. Эти методы чувствительны к наноразмерным неоднородностям поверхности. Они позволяют анализировать состояние поверхностей от макро- и микро- (сканирующие зонды Кельвина) до наномасштаба (атомно силовая микроскопия в режиме зонда Кельвина). В случае применения метода к диэлектрикам, измеряемым параметром будет являться собственный и/или приобретенный в результате внешних воздействий поверхностный потенциал (заряд). Заряд диэлектрика, в случае статической электризации может достигать десятков и сотен вольт. Методы КРП, как правило, являются компенсационными, а скомпенсировать высокий потенциал трудно выполнимо на практике. Поэтому для измерений существует необходимость в диэлектризации статически заряженных поверхностей.

Кроме того, при отсутствии априорной информации о происхождении заряда, затруднена корректная интерпретация результатов измерений. Повысить информативность измерений позволяет использование метода КРП в совокупности с внешним энергетическим воздействием (нагрев, осаждение ионов, трение и др.), обеспечивающим контролируемую электризацию.

Результатом проведенных исследований являются карты пространственного распределения статического потенциала образца ПА-6 (рис. 1) в исходном состоянии (а), после диэлектризации УФ излучением (b), после статической электризации трением (c) и повторном воздействии УФ (d). Результаты (рис. 1, b и d) указывают на достаточную воспроизводимость измерений.

Учитывая разрушающее воздействие длительного УФ излучения, полученные результаты могут получить развитие в качестве ускоренных методик для прогнозирования стабильности физико-механических свойств полимерных композитов и покрытий при воздействии УФ излучения.

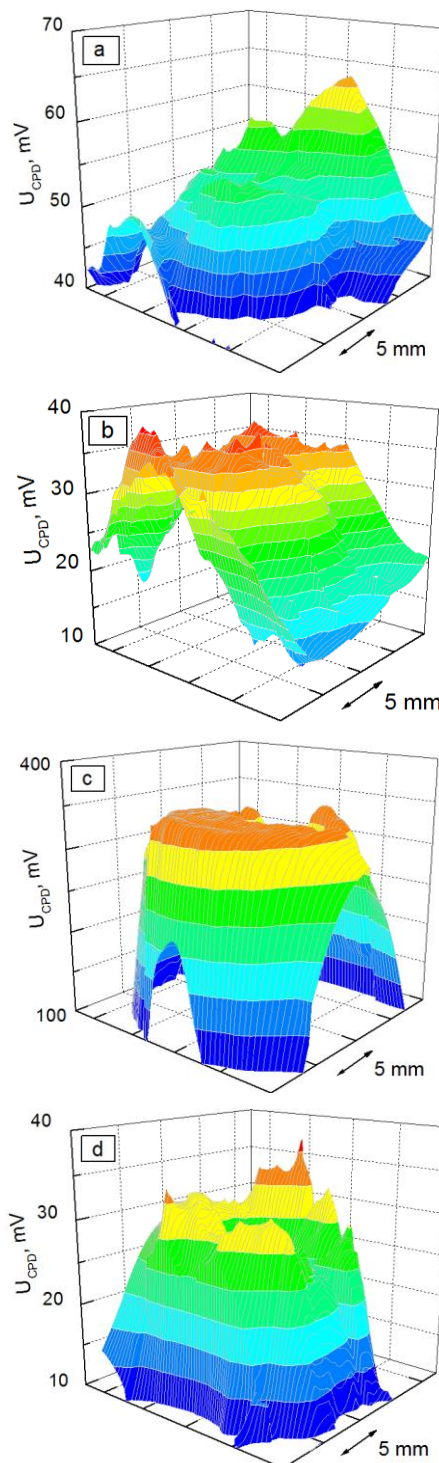


Рис. 1. Карты пространственного распределения электростатического потенциала поверхности полиамида-6, полученные методом контактной разности потенциалов

1. Пантелеев, К. В., Микитевич В. А., Жарин А. Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов // Приборы и методы измерений. — 2016 (7), № 1, 7—15.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ

Б.К. Рахадиллов¹, Ж.Б. Сагдолдина¹, Д.Б. Буйткенов¹, О.А. Степанова²

¹Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан;
rakhadilovb@mail.ru

²Государственный университет им. Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

Введение. Одним из способов повышения механических и триботехнических свойств полимеров является их облучение пучками заряженных частиц. При облучении пучками заряженных частиц в полимерах возникают промежуточные образования, обладающие высокой реакционной способностью — свободные радикалы, ионы, возбужденные молекулы. Они являются источниками дальнейших химических превращений, приводящим к изменениям химического строения, а следовательно, и свойств полимеров [1].

Цель. Изучить влияние электронного облучения на структуру и свойства модифицированных поверхностных слоев полимеров при вневакуумной электронно-лучевой обработке (ЭЛО).

Материалы и методы. ЭЛО полимеров PEI и PA6 осуществлялась на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-4 в Институте ядерной физики (г. Алматы). Образцы устанавливаются на стол ускорителя электронов, который перемещается относительно пучка электронов со скоростью 3,5 м/мин. Режимы ЭЛО: энергия пучка 1,3 МэВ, ток пучка 12 мА, доза облучения варьировалась от 50—500 кГр. Морфологию образцов полимера исследовали на атомно-силовом микроскопе Solver HV. Рентгеноструктурные исследования образцов полимера выполняли на дифрактометре X'PertPRO. Для исследования изменения химического состава полимеров использовался Фурье-ИК спектрометр FTIR-801 Simex. Образцы были исследованы при длине волны 450—4700 см⁻¹, разрешении 1 см⁻¹, t = 25 °С. Измерение твердости образцов полимера проводили на приборе ТК-2М в соответствии с ГОСТ 4670-91. Триботехнические испытания на трение скольжения проводили на трибометре ТНТ-S-BE-0000 с использованием стандартной методики «шар—диск». В качестве контртела использовали шарик диаметром 6,0 мм, из сертифицированного материала — Al₂O₃. Испытания проводили при нагрузке 10 Н и линейной скорости 10,5 см/сек, радиусом кривизны износа 5 мм, путь трения составлял 63,1 м.

Результаты. Исследования морфологии поверхности полимеров PA6 и PEI, проведенные методом АСМ, показали, что поверхность в исходном состоянии обладает менее выраженной морфологией, чем поверхность, подвергнутая ЭЛО. Поскольку основной эффект воздействия электронных пучков средних энергий на материалы состоит в их нагреве [2], то наиболее вероятной причиной наблюдаемого

изменения морфологии поверхности представляется расплавление приповерхностного слоя с последующим затвердеванием за времена, сопоставимые с длительностью импульса. С ростом дозы облучения микронеровность облученных поверхностных слоев увеличивается.

На дифрактограммах PA6 зарегистрированы два дифракционных пика при $2\theta = 20,5^\circ$ и $23,5^\circ$, которые являются отличительной особенностью α -фазы PA6. Этим объясняется кристаллическая форма полиамида PA6. Но при дозах облучения 150 кГр интенсивность пика α -фазы увеличивается по сравнению с образцами облученных дозой 50 кГр и с необлученными образцами, это может быть связано с увеличением кристалличности материала. Возможно, процесс облучения ускорил скорость сшивания свободных радикалов и сдерживал пиролиз и рекомбинацию, которые приводят к увеличению кристалличности [3]. А из дифрактограммы PEI не видно таких изменений. Это, возможно, связано с тем, что у PEI нет свободных радикалов, которые влияют на изменение кристалличности материала в процессе облучения. Анализ полученных инфракрасных спектров необлученных и облученных образцов полимеров PA6 и PEI, показал, что облучение не приводило к изменению кристаллическую форму полимеров PA6 и PEI, но приводило к частичному кристаллическому повреждению.

Триботехнические испытания показали, что после облучения полимера PA6 дозой от 50 до 250 кГр наблюдается повышение его износостойкости. Установлено, что после ЭЛО твердость полимера PA6 увеличивается до 1,2 раза, а твердость полимера PEI до 1,5 раза. При этом самое высокое значение твердости наблюдается после облучения дозой 100-250 кГр.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по программе «Грантовое финансирование научных исследований» (код проекта — AP05134982).

1. Raghu S, Archana K, Sharanappa C, Ganesh S, Devendrappa H. The physical and chemical properties of gamma ray irradiated polymer electrolyte films // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2015 (426), 55—62
2. В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь. Электронно-лучевая обработка материалов. — Минск: Белорусская наука. — 2006
3. Shifeng Zhu, Meiwu Shi, Meifang Zhu Effects of Electron-Beam Irradiation Crosslinking on PA6 Fibers // Fibers and Polymers. — 2013 (14), 525—529

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНОГО НАПОЛНЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЕРМОСЛОЕВ ШИН

В.Н. Усова¹, С.И. Каюшников², А.Ю. Люштык²,
Г.Н. Лейзеренок², С.П. Богданович¹, С.С. Песецкий¹

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

²ОАО «Белшина», Бобруйск, Беларусь

Введение. Использование гибридных наполнителей, включающих слоистые глинистые силикаты (СГС) и технический углерод в различных элементах грузовых шин является одним из путей улучшения их технических характеристик [1, 2]. В работе [3] показана возможность снижения воздухопроницаемости гермослоев шин при введении в их состав добавок СГС. Представляло научный и практический интерес более подробно проанализировать воздухопроницаемость резин, содержащих гибридные наполнители.

Цель работы — анализ барьерных свойств гермослоев грузовых шин в зависимости от их состава и температуры испытаний.

Материалы и методы исследования. Для анализа воздухопроницаемости использовали вулканизированные пластины толщиной 1 мм из резин на базе ХБК и его смеси с НК. В качестве гибридного нанонаполнителя при получении резиновых смесей применяли органоглину типа Cloisite 30B (Cl 30B) на основе Na⁺-монтмориллонита, в которой в качестве ПАВ использовали алкильные производные четвертичной соли аммония общей формулы 2(HE)MT, где М — метильный, Т — таллилный радикалы, HE — 2-гидроксиэтил. Концентрация СГС в резиновой смеси с учетом данных работы [3] составляла 3% от веса каучука.

Исследования воздухопроницаемости проводили с помощью установки GDP-С ф. Brugger Feinmechanik GmbH (Германия), которая предназначена для определения скорости проникновения газов (GTR) согласно ИСО 15105-1:2007 [3]. С помощью термостата устанавливали температуру испытуемого образца в диапазоне от 20 до 80 °С.

Результаты и их обсуждение. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что GTR (воздух) гермослоев зависит от температуры. При ее повышении от 20 до 80 °С GTR, которая при толщине испытуемого образца 1 мм равна коэффициенту воздухопроницаемости, возрастает в 19—29 раз. При этом, GTR гермослоев на базе смеси НК и ХБК резин с добавками СГС имеет значение более низкое, чем у соответствующего СС, а с увеличением температуры до 80 °С возрастает и даже несколько превышают тако-

ую для СС. В гермослоях на основе ХБК, наоборот, добавки СГС обеспечивают пониженные значения GTR при повышенных (50 и 80 °С) температурах.

Таблица 1. Зависимость воздухопроницаемости резин гермослоев от температуры испытаний

Состав резины образца гермослоя	GTR (воздух), см ³ /м ² ·24ч·атм при температуре, °С:			
	20	30	50	80
Серийный состав (СС) на основе смеси (НК + ХБК)	22,5	42,1	130,0	425,0
СС на основе НК + ХБК + СГС	21,2	40,5	133,0	516,0
СС на основе ХБК	9,4	19,7	69,8	276,0
СС на основе ХБК + СГС	9,4	21,4	59,8	243,0

Причины столь резкого повышения воздухопроницаемости резин гермослоев при температуре 80 °С требуют тщательного изучения. Одной из них может быть разрушение сетки физических связей в структуре наполнителей, что обусловлено ростом молекулярной подвижности каучука и проявлением эффекта Пейна.

При использовании полученных данных изготовлены опытные образцы шин, в состав гермослоев которых введена органоглина Cl 30B в количестве 1,5 м.ч. на 100 м.ч. каучука. Следует отметить также, что чрезмерное повышение концентрации СГС в резиновой смеси нецелесообразно, поскольку ее введение может оказать существенное влияние на изменение оптимальных условий вулканизации [1]. Шины с модифицированным гермослоем проходят эксплуатационные испытания.

1. Rubber-Clay Nanocomposites. Science, Technology, and applications // Ed. by M. Galimberti. Wiley. — 2011. <http://dx.doi.org.10.5772/51410>
2. Усова В.Н., Васильев П.В., Валенчик Г.П., Лейзеренок Г.Н., Богданович С.П., Каюшников С.Н., Песецкий С.С. Воздухопроницаемость гермослоев шинных резин, модифицированных слоистыми глинистыми силикатами // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2017), Гомель, 27—30 июня 2017 г. ИММС НАНБ. — 2017. 104
3. ИСО 15105-1:2007 Пластмассы. Пленки и листы. Определение скорости проникновения газов. Часть 1. Методы определения по перепаду давления

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ ПА6/ОРГАНОГЛИНА, ПОЛУЧАЕМЫХ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ В РАСПЛАВЕ

В.Н. Усова, Ю.С. Кузнецова, С.П. Богданович

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

Введение. В настоящее время в технологии нанокompозитов (н-ПКМ) на основе термопластов и органогилин (ОГ) метод компаундирования, основанный на реакционном смешении компонентов в полимерном расплаве, является основным и находит все более массовое применение [1]. Его практическая реализация может осуществляться двумя путями: в одну стадию, когда ОГ и полимерное связующее вводятся непосредственно в материальный цилиндр экструдера и при двухстадийном (двухступенчатом) процессе компаундирования, основанном на применении суперконцентратов (мастербэтчей) наноглин. Несмотря на наличие ряда специальных публикаций вопрос, связанный с экспериментальным обоснованием выбора той или иной технологии компаундирования при получении разнообразных н-ПКМ требует более тщательного изучения.

Цель работы — анализ структуры и свойств н-ПКМ типа ПА6/ОГ, полученных методом реакционной экструзии в расплаве при использовании одно- и двухступенчатых процессов компаундирования.

Материалы и методы исследования. В качестве наноглин использовали ОГ марок Cloisite 30B (Cl 30B), Монамет 1О1 и Монамет 1О4 на основе Na⁺-монтмориллонита, концентрацию которых в ПА6 варьировали в пределах от 0,5 до 6 мас.%. ОГ вводили в расплав ПА6 при компаундировании в двухшнековом экструдере с однонаправленным вращением шнеков, диаметром 35 мм и L/D = 40. Все составы содержали 0,4 мас.% изоцианатного удлинителя цепи (МГТ-Ж) и 0,3 мас.% стабилизатора Irganox 1098. При компаундировании материалов использовали два метода смешивания: одностадийное (при прямом введении ОГ в ПА6) и двухстадийное (при введении ОГ из предварительно подготовленного на том же оборудовании концентрата ПА6/ОГ — 30 мас.%). Исследовали механические свойства нанокompозитов, реологические характеристики их расплавов, а также структуру по данным ДСК и РСА.

Результаты и их обсуждение. При использовании двухстадийной технологии, основанной на предварительном получении концентратов ОГ в полиамидной матрице, по сравнению с прямым введением наночастиц выявлен ряд особенностей. В частности, установлено, что при этом наблюдается улучшение интеркалирования ОГ в объеме ПА6 (так, например, Cl 30B может быть полностью

эксфолирована). Наблюдается также повышение степени кристалличности ПА, как в поверхностных слоях, так и в объеме блочных образцов. ОГ, независимо от типа и концентрации, оказывает нуклеирующее действие на кристаллизацию ПА6: резко возрастает интенсивность и существенно сужается основной дифракционный пик при $2\theta \approx 21,15^\circ$, что указывает на образование более совершенных кристаллитов γ -формы. При использовании двухстадийной технологии компаундирования нуклеирование протекает в целом более эффективно, чем при одностадийной. Причиной этого является повышенная степень диспергирования ОГ в полимере [2].

Все композиты, полученные по двухстадийной технологии, обладают заметно более низкой текучестью расплава. Наиболее вероятной причиной этого является повышение степени диспергирования ОГ в объеме ПА6. Кроме того, следует учесть, что в составы всех н-ПКМ был дополнительно введен удлинитель цепи МГТ-Ж, реагирующий с макромолекулами ПА6 в расплаве. При двухстадийной технологии компаундирования эти взаимодействия протекают более полно. Поскольку при этом возможно удлинение макроцепей и частичное межмолекулярное сшивание, то происходят соответствующие изменения и показателей реологических свойств материалов.

Добавки ОГ оказывают упрочняющее влияние на ПА6: повышается прочность при растяжении ($\sigma_{рм}$) и модуль упругости (E_p). Особенно ярко данный эффект реализуется в композитах ПА6/Cl 30B (σ_p при [Cl 30B] = 6 мас.% увеличивается в $\approx 1,4$ раза, а E_p — $\approx 1,6$ раза [2]. При этом составы, полученные по двухстадийной технологии, обладают несколько более высоким комплексом показателей механических свойств.

Указанные эффекты наиболее выражены для н-ПКМ, в которых в качестве ОГ используется Cl 30B.

1. Pesetskii S.S., Bogdanovich S.P., Aderikha V.N. Polymer/Clay Nanocomposites Produced by Dispersing Layered Silicates in Thermo-plastic Melts In: «Polymer Nanocomposites for Advanced Engineering and Military Applications», editor N. Ramdani. IGI Global. USA. — 2019, Chapter 3, pp. 66–94.
2. Богданович С.П., Кузнецова Ю.С., Усова В.Н., Песецкий С.С. Влияние технологии компаундирования в расплаве нанокompозитов ПА6/органогилина на их структуру, механические и реологические свойства // Полимерные материалы и технологии. 2018, т. 4, № 2, с. 50–60.

PREPARATION OF LAYER-BY-LAYER COATED MOF POWDER

T.G. Shutava¹, V.V. Pankov², C. Jansen³, C. Janiak³¹Institute of Chemistry of New Materials, NAS of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: shutova@ichnm.basnet.by²Belarusian State University, Minsk, Belarus³Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Institute of Inorganic Chemistry and Structural Chemistry, Germany

Porous polymers with 3D metal-organic network, or metal-organic framework (MOF), are of great interest as materials with high water sorption capacity (0.5—1.5 g/g) and developed BET surface (above 1000 m²/g) for new ecologically friendly heat transforming technologies based on water vapor sorption and desorption [1]. For practical application, they are admixed into polymeric tablets or granules; the material partially loses porosity and sorption capacity of original MOF.

We report on the first attempt to prepare new composite in which bulk MOF powder is combined with permeable to water and water vapor polyelectrolyte shell coating formed by the layer-by-layer (LbL) assembly method [2]. The small polymer-to-MOF ratio presumed in the composite does not impair the bulk moisture absorbing characteristics govern by MOF zeolite-like structure. The hydrophilic polyelectrolyte shell on the surface of MOF crystals in the atmosphere of water vapor is assumed to be quickly saturated with water, the interfacial conditions to change and the adsorption / desorption of water vapor by the composite to improve.

Layer-by-layer assembly based on sequential adsorption of positively and negatively charged polyelectrolytes on the coated surface allows one to form multilayered shell with controllable thickness of 1 to 100 nm on micro/nanoparticles. The ultrasonication applied during the LbL assembly minimizes aggregation of nanoparticles in polyelectrolyte solutions and increases the degree of dispersion of bulk powders [2].

Materials and methods. Five MOF powders which differ in pore structure, BET surface and water sorption characteristics were used as template material for coating with a LbL polyelectrolyte shell. The commercially available polycations (chitosan (CH, 75% DD), poly(diallyldimethylammonium chloride), polyethyleneimine) and polyanions (polystyrene sulfonate, polyacrylic acid, carboxymethylcellulose, dextran sulfate, κ -carrageenan) were used in LbL shell compositions. Two grafted copolymer of CH with polyethylene glycol 5 kDa and dextran 6 kDa (CH-DEX) were utilized in order to increase hydrophilicity of the shell.

Typically, MOF powder was dispersed in water at a 2 mg/mL concentration by sonicating in a *Sapphire* ultrasonic bath for 20 s. Then 0.25 mg polyelectrolyte per 1 mg of MOF was added as an aliquot of a 10 mg/mL polyelectrolyte solution and the suspension was sonicated for 60 s. The coated particles were separated by centrifugation (a *Z36HK Hermle* centrifuge), washed once with water to remove unadsorbed polyelectrolyte and finally redispersed at ~ 4 mg/mL concentration. The rest

of the layers were deposited on the surface of nanoparticles in the same way. The shells consisted of 1 to 6 polyelectrolyte layers (0.5-3.0 bilayers) were formed. The LbL coated MOF was dispersed in water, frozen at -20 °C, and lyophilized.

Result and discussion.

An alternation of ζ -potential of MOF particles upon adsorption of positively and negatively charged polyelectrolytes confirms the formation of LbL shell on the surface of MOF particles.

The hydrodynamic diameter of particles in the pristine MOF powders varies from 200 nm to 2.3 μ m. The micro-sized MOF either retains the mean diameter upon LbL shell formation or partially disintegrates into particles of half of the initial size. The shells of CH and its copolymer CH-Dex favor the formation of smaller MOF particles. The MOF with particles diameter lower than 700 nm tends to aggregate to various degree after adsorption of polyelectrolytes.

The BET surface of LbL coated MOF is comparable to that of pristine sample and in some cases even surpasses it by 5-60%. The increase is associated with stabilization of smaller MOF particles by hydrophilic LbL shells. A decrease of BET surface as compared with unmodified sample is typical for MOF aggregated with polyelectrolyte.

For four MOF cores under investigation the water sorption capacity upon LbL modification remains on the level of pristine powder. For these samples, the composition and number of polyelectrolyte bilayers in the coatings do not affect the sorption properties. For one series of LbL coated MOF powders that have a low BET surface due to aggregation by polyelectrolytes a 40% decrease of the maximum water sorption was observed, independently of the shell material.

Thus, MOF powders are principally suitable for modification by LbL assembly of polyelectrolytes. The obtained material mostly keeps adsorption characteristic of bulk MOF powder.

Acknowledgements The research was supported financially by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant № X19MC-028).

1. Janiak C. and Henninger S.K. Porous coordination polymers as novel sorption materials for heat transformation processes // *Chimia* — 2013 (67), № 6 — P. 419—424
2. Shutava T.G., Livanovich K.S., Pankov V.V. Cooperative effect of polyethylene glycol-grafted chitosan and albumin on layer-by-layer nanocapsules stability // *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects* — 2018 (539), — P. 69—79

БИОЦИДНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПВХ

Э.Н. Ахмедов¹, Т.Д. Гулиев¹, Г.А. Рамазанов¹, А.М. Гулиев²¹Сумгайытский государственный университет, Сумгайыт, Азербайджан²Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан

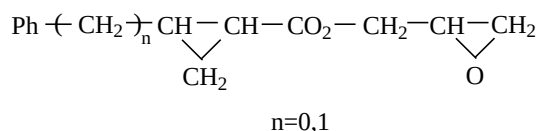
Введение. В последнее время среди полимерных композиционных материалов (ПКМ) одно из ведущих мест занимают композиции, изготовленные на основе ПВХ. Создание таких ПКМ предусматривает введение в полимерную матрицу из ПВХ различных добавок, в том числе наполнителей, стабилизаторов, пластификаторов, смазок и т.д. [1].

В связи с возросшими в последние годы требованиями из числа этих добавок стабилизаторы представляют особый интерес в плане их свойств, типа, принципов действия и применения.

Из данных, имеющихся в литературе, известно, что обычно биостабилизирующим действием в целом обладают вещества, содержащие в своих молекулах ионы серы и переходных металлов, таких как Cu, Zn, Pb, As и др. Такие соединения вводят в полимеры в чистом виде или в виде концентрированных растворов в составе других добавок (например, в пластификаторе для ПВХ).

Перспективным направлением в стабилизации ПВХ является применение веществ, содержащих в своих молекулах циклические группы, такие как эпиксидные, циклопропановые и др., способные легко реагировать с HCl. Введение этих веществ в состав композиций из ПВХ обеспечивает удовлетворительные реологические, физико-механические и антигрибковые характеристики.

Методика и результаты экспериментов. Синтезированные нами фенил (бензил) замещенные эпиксидциклопропаны, которые содержат в молекулах карбонильные, эпиксидные и циклопропановые группы, способные легко реагировать с HCl были использованы в качестве стабилизаторов ПВХ. Можно было ожидать, что введение этих соединений в состав композиций из ПВХ будет обеспечивать удовлетворительные реологические, физико-механические и антигрибковые характеристики.



Как показали эксперименты, используемые эпиксифенил (бензил) циклопропаны являются эффективными стабилизаторами, придающими композициям, приготовленным на основе ПВХ, улучшенные физико-механические свойства и грибоустойчивость.

Исследовано влияние синтезированных фенил (бензил) замещенных эпиксидциклопропанов на критическую температуру растворения эмульсионного ПВХ в бинарной смеси «пластификатор/ДОФ+комплексный стабилизатор». Полученные результаты показали экстремальную зависимость критической температуры растворения от количества введенных комплексных стабилизаторов [2].

Наряду с критической температурой растворения, для изготовленных композиций (в виде пленок) были определены некоторые физико-механические показатели, в том числе предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве, а также модуль упругости при 100%-но деформации пленки.

Установлено что найденные значения термостабильности для пленок ПВХ имеют близкие значения. Летучесть пленок композиций несколько ниже летучести пленок, изготовленных без добавки синтезированных эпиксисоединений.

Выявлено что используемые стабилизаторы обладают разносторонним действием, что проявляется в повышении свето- и термостабильности, физико-механических характеристик используемых полимерных композиций [3].

Установлено что, полимерные композиции обладают различной устойчивостью к действию микроорганизмов. При этом наибольшей устойчивостью обладают полимерные композиции, в состав которых входят, наряду с эпиксидциклопропанами и комплексными стабилизаторами — соли переходных металлов.

Проведенные исследования показали, что биостойкость изготовленных полимерных композиций непосредственно связано с их составом и проявляется в результате взаимодействия всех компонентов композиции. Такие полимерные композиции могут быть полезными при применении их в медицинской практике, сельском хозяйстве, в быту и др. областях.

1. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии. 2011, 416 с.
2. Смирнов В.Ф., Мочалова А.Е., Смирнова О.Н. и др. Деградация микромицетами композиционных материалов на основе природных и синтетических полимеров. // Поволжский экологический журнал. 2011, № 4, с. 537—541
3. Рахимова Е.Б., Исмагилов Р.А., Зайнуллин Р.А. и др. Синтез α,ω-бис-1,5,3-дитиазепанов и их фунгицидные свойства. // Журн. Прикл. Химии. 2013, т. 86, № 10, с. 1547—1551

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НОВОГО ХЕЛАТНОГО ИОНИТА ФИБАН ХС-1

В.И. Грачек, А.П. Поликарпов, А.А. Шункевич, О.И. Исакович

Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Проблему очистки питьевой воды от ионов двухвалентного железа, марганца и других катионов тяжелых и переходных металлов позволяют решить новые волокнистые хелатные материалы ФИБАН Х-1 и Х-2, созданные в ИФОХ НАН Беларуси на полиакрилонитрильной матрице. Однако, полиакрилонитрильная матрица не всегда позволяет использовать иониты для сорбции, разделения и концентрирования элементов при повышенных температурах, в агрессивных средах. Нами получен новый хелатный волокнистый ионит с иминодиацетатными группами ФИБАН ХС-1 с довольно высокими значениями СОВ по карбоксильным группам от 3,2 до 4,0 мг-экв/г [1]. Матрицей для получения катионита является волокно полипропилена с привитым сополимером стирола и дивинилбензола.

Цель настоящей работы — оценить ионообменные и сорбционные свойства нового катионита по катионам тяжелых и цветных металлов.

Исследование зависимости коэффициентов распределения ионов между ионитом и раствором от pH равновесных растворов представлено на рис. 1

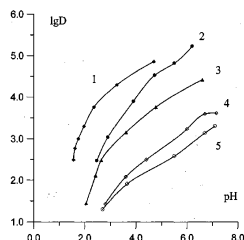


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения D между ионитом и раствором от pH : 1 — Cu, 2 — Pb, 3 — Ni, 4 — Cd, 5 — Mn.

Как видно из рис. 1 коэффициенты распределения для ионов металлов максимальны в области pH 4—6 за исключением ионов меди, у которых максимум наблюдается при pH 4. Для всех ионов в кислой среде коэффициенты распределения имеют невысокие значения. Исключение составляют ионы меди, у которых уже при pH 2,8 довольно высокое значение коэффициента распределения.

Характер зависимости D от pH раствора для каждого иона металла можно объяснить процессом комплексообразования иона металла с иминодиацетатными группами ФИБАН ХС-1 и устойчивостью этих комплексов при различных значениях pH .

Более детально изучена сорбция меди, свинца и никеля. На рис. 2 приведены изотермы сорбции на катионите ФИБАН ХС-1.

Анализ полученных изотерм показывает, что сорбционная емкость катионита по отношению к ионам исследуемых металлов убывает в следующем

ряду: $Cu > Pb > Ni$. С увеличением концентрации сорбционная емкость по ионам металлов возрастает. Исследование кривых позволяет отметить, что ФИБАН ХС-1 количественно извлекает ионы металлов в широком интервале концентраций. Из полученных данных следует, что катионит ФИБАН ХС-1 может быть использован для концентрирования и извлечения ионов тяжелых металлов.

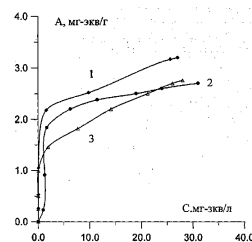


Рис. 2. Изотермы сорбции: 1 — Cu, 2 — Pb, 3 — Ni.

Сорбционную активность ФИБАН ХС-1 в динамических условиях изучали из многоионного модельного раствора, содержащего соли металлов: $CuCl_2$, $NiCl_2$, $CoCl_2$, $ZnCl_2$, $CdCl_2$, $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 2–10 ммоль/л на фоне 2 ммоль/л $CaCl_2$.

Ряд избирательности ионов (рис. 3) в динамическом режиме в выбранных условиях для ФИБАН ХС-1 имеет следующий вид: $Pb > Cu > Cd > Ni > Zn > Co$. Из рис. 3 видно, что сорбент ФИБАН ХС-1 в динамических условиях, в отличие от статики, сорбирует ионы кадмия лучше, чем ионы никеля.

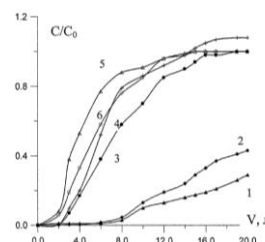


Рис. 3. Выходные кривые сорбции ионов тяжелых и цветных металлов на волокнистом ионите ФИБАН ХС-1:

Таким образом, получен новый катионит 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.

1. Грачек В.И., Лысенко Г.Н., Шункевич А.А. и др. Получение и исследование нового волокнистого ионита ФИБАН ХС-1 // Весті НАН Беларусі, сер. хім. навук. — 2017. — № 4, 86—92.

СИНТЕЗ И ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ ФЕНОКСИКАРБОНИЛ П-ЦИКЛОПРОПИЛСТИРОЛА

К.Г. Гулиев¹, А.И. Садыгова², Ц.Д. Гулвердашвили², Д.Б. Тагиев²

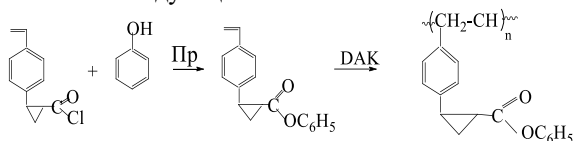
¹Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; ipoma@science.az

²Азербайджанский Медицинский Университет, кафедра биофизической и биоорганической химии

Интересным классом мономеров с функциональными группами являются ненасыщенные циклопропансодержащие соединения. С целью получения новых представителей таких мономеров нами осуществлён синтез и исследована радикальная полимеризация феноксикарбонилпарацклопропилстирола и некоторые свойства полученного полимера.

Синтез ФКЦПС был осуществлён взаимодействием п-дивинилбензола с этилдиазоацетатом в присутствии катализатора безводного CuSO_4 . В начале был получен этоксикарбонилциклопропилстирол (ЭКЦПС), затем, действием NaOH на ЭКЦПС был превращён в соответствующую кислоту [1] с выходом 95%. Затем взаимодействием тионилхлористого на [1] был получен хлорангидрид п-циклопропилстирола.

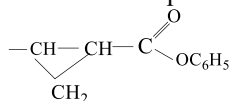
Синтез ФКЦПС и процесс полимеризации протекает по следующей схеме:



Полимеризацию ФКЦПС проводили в массе и в растворе бензола при 70°C , в качестве инициатора использовали ДАК.

Состав и структура мономера и полимера подтверждена элементным анализом и данными ИК-и ПМР-спектроскопии. Полученный полимер на основе феноксикарбонилп-циклопропилстирола растворяется в бензоле, хлорированных углеводородах, не растворяется в метаноле, серном эфире.

При сопоставлении ИК-спектра мономера и полученного на его основе полимера выявлено, что в полимеризации принимают участие только винильные группы, находящиеся в ФКЦПС. На основании спектральных анализов показано, что



фрагменты остаются в боковой цепи не затронутыми. Изучена кинетика гомополимеризации ФКЦПС и показано, что порядок реакции по инициатору составляет 0,5, по мономеру — 1. Выявлено, что полимеризация ФКЦПС протекает в изученных условиях без индукционного периода, с постоянной начальной скоростью, значительно пре-

вышающей скорость полимеризации самого стирола.

Молекулярный вес полученного полимера составляют ~ 450.000 — 500.000 в зависимости от условий полимеризации. Такая закономерность означает, что процесс полимеризации ФКЦПС протекает по тем же закономерностям, что и радикальноцепная полимеризация виниловых мономеров. Наличие в звеньях в боковой цепи молекулы синтезированного полимера реакционноспособных группировок представляет большой интерес для получения фоторезистных полимерных материалов для микроэлектроники. В связи с этим были проведены фотохимические исследования синтезированного полимера. Структурирование фотохимических процессов контролировали методом ИК-спектроскопии.

Выявлено, что УФ-облучения полученного полимера легко претерпевает структурирование, в результате чего пленка, полученная на его основе становится нерастворимой и с малой дефектностью. Показано, что структурирование протекает за счет раскрытия циклопропанового кольца и карбонильной группы. Проведенные исследования показали возможность синтеза нового негативного фоточувствительного полимера с высокими литографическими свойствами. Этот полимер обладает такими свойствами, как высокая фоточувствительность, плёнокообразующая способность, хорошая растворимость перед облучением, стойкость к растворителям после облучения и хорошая термическая стабильность, которые очень важны для фоторезиста. Показано, что УФ-облучение зависит от толщины плёнок, т.е. чем толще плёнка, тем образующаяся при воздействии излучения плёнка имеет вид рыхлой сетки с большими ячейками, которая сильно набухает при проявлении и снижается при сушке полимерного слоя, вызывая складки и морщины. Хорошие результаты получены при работе с плёнками толщиной 0,2—0,3 мкм. Кроме того показано, что полученный полимер обладает высокой прозрачностью (n_d^{20} —1,6030). Таким образом, синтезированный полифункциональный полимер могут быть использованы для создания фоточувствительного и оптического материала.

1. Гулиев К.Г., Назаралиев Х.Г., Гулиев А.М. Синтез и полимеризация функциональнозамещенных циклопропилстиролов. // Азерб. хим. журн. 1999. №1. С. 87—89.

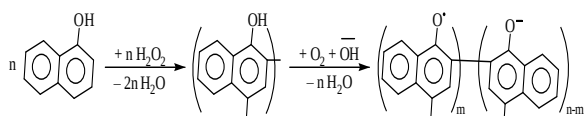
ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
ОЛИГОГИДРОКСИНАФТИЛЕНОВ И ИХ КОМПОЗИЦИЙ С ТЕРМОПЛАСТАМИ

Р.Р. Гулиев, Д.Н. Алиева, Р.А. Ахмедова, Б.А. Мамедов

Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт; ipoma@science.az

Известно, что различные типы электропроводящих или антистатических полимерных материалов широко применяются в различных областях техники и промышленности [1]. Получение их возможно при использовании электропроводящих наполнителей, в том числе, органической природы, которые придает таким материалам, помимо электропроводности, еще и ценные физико-механические свойства из-за хорошей совместимости компонентов [2—4].

Учитывая это обстоятельство, нами синтезированы олигогидрокси нафтилены, включающие реакционноспособные гидроксильные группы (ОГН), окислительной поликонденсации 1-нафтаола в присутствии пероксида водорода, а макроорадикалы нафтоксильного типа, с различной концентрацией парамагнитных центров (ПМЦ) путем окисления ОГН кислородом в щелочной среде:

where $n = 5 \div 11$ and $m = 1 \div 2$

Синтезированные образцы ОГН — порошки темно-коричневого или черного цвета, хорошо растворимые в полярных органических растворителях и плавящиеся под нагрузкой при 383—408 К в зависимости от условий синтеза. Их состав и структура установлена методами элементного, химического и ИК-спектрального анализов, а молекулярно-массовые показатели — методом гель-проникающей хроматографии.

Таблица 1. Условия синтеза и некоторые показатели олигогидрокси нафтиленов ($\tau = 4$ часа)

НФ, моль/л	H ₂ O ₂ , моль/л	T, К	Выход, %	ОН, %	$\overline{M}_w$	$\overline{M}_n$
1.2	1.2	343	29.1	10.1	850	730
1.2	1.2	353	34.5	10.3	890	750
1.2	1.2	363	45.6	11.1	960	790
1.2	1.2	368	51.7	11.5	1230	870
1.6	1.6	368	52.4	11.8	1270	960
1.2	2.4	368	73.5	10.6	1370	1030
1.2	3.6	368	86.9	11.9	1560	1180

В ИК спектрах олигомеров при 3400—3580 см⁻¹ фиксируется широкая интенсивная полоса поглощения, характерная для ассоциированных гидроксильных групп. Кроме того, проявляются полосы поглощения нафталинового кольца (1455, 1520 и 1600 см⁻¹) и внеплоскостных деформационных колебаний ароматических —СН групп при 770 см⁻¹ (для четырех со-

седних СН-групп) и 875—880 см⁻¹ (для изолированных —СН групп).

В УФ-спектрах синтезированных образцов ОГН зафиксированы широкий интенсивный пик с максимумом при 220 нм, а также менее интенсивные полосы поглощения с максимумами при 285 и 330 нм.

Полученные образцы ОГН проявляют парамагнитные (концентрация ПМЦ $\sim 1.4 \cdot 10^{17} \div 1.8 \cdot 10^{19}$ спин/г) и полупроводниковые свойства ($\sigma_0 \sim 10^{-8} \div 10^{-4}$ Ом⁻¹·см⁻¹ при 298 К, $E = 1.3 \div 1.67$ эВ). Причем, рост концентрации ПМЦ в составе образцов ОГН на 1—2 порядка приводит к заметному увеличению их электропроводности.

Показано, что образцы ОГН проявляют электронообменную активность. Их щелочные растворы интенсивно поглощают молекулярный кислород. Следовательно, эти олигомеры могут выполнять функцию антиоксиданта в составе композиций и с тем увеличивают тепло- и термостойкость, а также срок их эффективной эксплуатации.

Таблица 2. Значения ρ_v композиционных материалов на основе термопластов и ОГН

ОАФ, %	Термопласт, %	ρ_v (Ом·см), на основе		
		ПЭНП	ПП	ПС
5	95	$0.81 \cdot 10^8$ ($7.3 \cdot 10^8$)	$2.5 \cdot 10^8$ ($9.1 \cdot 10^8$)	$4.8 \cdot 10^8$ ($9.8 \cdot 10^8$)
10	90	$3.5 \cdot 10^8$ ($6.4 \cdot 10^8$)	$8.1 \cdot 10^8$ ($1.2 \cdot 10^7$)	$9.5 \cdot 10^8$ ($2.7 \cdot 10^7$)
15	85	$8.6 \cdot 10^8$ ($3.7 \cdot 10^7$)	$9.8 \cdot 10^8$ ($6.0 \cdot 10^7$)	$2.8 \cdot 10^8$ ($8.5 \cdot 10^7$)

Возможность увеличения электропроводности ОАФ с возрастанием концентрации ПМЦ в его составе была использована для создания антистатических полимерных композиций на основе термопластов путем введения в их состав 5÷15% ОАФ последующей обработкой поверхности материала водным или спиртовым раствором щелочи. Из табл. 2 видно, что ρ_v после введения ОАФ в состав термопластов существенно уменьшается.

- Herbert Naarmann "Polymers, Electrically Conducting" in Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2002, 429 p.
- Каверинский В.С., Сметов Ф.М. Электрические свойства лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия, 1990, 158 с.
- Pud A., Ogurtsov N., Korzhenko A., Shapoval Q. / Prog. Polym. Sci. 2003. V. 28. P. 1701.
- Mamedov B.A., Vidadi Y.A., Alieva D.N., Ragimov A.V. / Polymer International. 1997.
- Mashaeva S.S., Mamedov B.A., Agaev N.M. et al. / Processes of petrochemistry and oil refining. 2008. V. 34. N 2. P. 60.

МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДИАНОВОЙ СМОЛЫ

Н.И. Курбанова, С.К. Рагимова, Н.Я. Ищенко, А.Т. Алыев, А.М. Кулиев

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

Эпоксидные смолы по целому ряду своих свойств выделяются среди прочих полимерных материалов. Они широко используются в качестве электроизоляционных материалов, связующих для композиционных материалов, применяются для изготовления изделий различного функционального назначения. С развитием нанотехнологий было подтверждено, что более значительный эффект на эксплуатационные характеристики оказывают наноразмерные наполнители.

Добавление наночастиц наполнителя в эпоксидную смолу позволяет модифицировать и расширять области их практического применения. Широкое распространение в практике модификации эпоксидных смол получили углеродные наноструктуры, наноразмерные частицы металлов [1,2].

Цель работы — получение и исследование структуры и свойств нанокompозитных полимерных материалов на основе эпоксидиановой смолы (ЭД-20) с применением в качестве нанонаполнителей (НН) металлсодержащих наночастиц (НЧ), стабилизированных на полимерной матрице.

В работе использованы: эпоксидная смола ЭД-20 с эпоксидным числом 22, полиэтиленполиамин (ПЭПА), метилэндиковый ангидрид (МЭА), ускоритель горячего отверждения УП606/2.

В качестве НН использовали НЧ оксида меди I (Cu_2O) и оксида цинка (ZnO), стабилизированные на полимерной матрице промышленного полиэтилена высокого давления, полученные механо-химическим методом в расплаве полимера. Содержание наночастиц 5 мас.%, размер — $11 \div 17$ нм, степень кристалличности — $35 \div 45\%$. Соотношение компонентов композиции (мас.%): ЭД-20/ПЭПА/НН = 100/12/(0.25; 0.5; 1.0) и ЭД-20/МЭА/НН = 100/100/(0.25; 0.5; 1.0)

Для исследования влияния наночастиц на термическую стойкость эпоксидных материалов были приготовлены композиции "холодного" и "горячего" отверждения при указанных выше соотношениях.

Наночастицы оксидов меди и цинка не растворяются в эпоксидной смоле, в связи с этим, они вводились в ЭД-20 при нагревании и перемешивании, затем смесь охлаждалась до комнатной температуры и добавлялось расчетное количество ПЭПА или МЭА.

Отверждение изучалось методом дифференциально-термического анализа (ДТА) на дериватографе марки Q-1500D фирмы МОМ (Венгрия). Испытания проведены в атмосфере воздуха в динамическом режиме при нагреве образца $5 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$ от 20 до 500°C , навески 100 мг, чувствительности каналов ДТА-250мкВ, ТГ-100, ДТГ-1 мВ. Отверждение проводили в платиновых тиглях.

Исследовано влияние нанонаполнителей, содержащих наночастицы оксидов меди и цинка на особенности свойств эпоксидиановой смолы, отвержденной ПЭПА и МЭА+ускоритель горячего отверждения УП606/2.

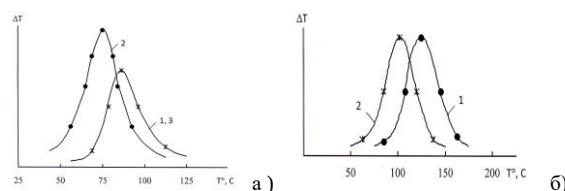


Рис. Кривые отверждения ЭД-20 с ПЭПА(а) и МЭА(б)

Показано, что введение в композицию на основе ЭД-20 нанонаполнителя, содержащего наночастицы оксида меди сдвигает температуру реакции «холодного» отверждения от 90 до 75°C , а «горячего» отверждения от 125 до 100°C и способствует увеличению ее термостабильности, что подтверждается ростом энергии активации термоокислительной деструкции ($E_{\text{акт.}}$) от 210 до 225 кДж/моль .

Показано, что наночастицы оксида меди повышают термические свойства ЭД-20 и являются катализаторами реакции отверждения, о чем свидетельствует высота пика на кривой отверждения. При этом наночастицы оксида цинка практически не влияют на термические свойства нанокompозитов на основе ЭД-20.

1. Ястребимская А.В., Огрель Л.Ю. Разработка и применение композиционного материала на основе эпоксидиановой смолы для строительных конструкций и теплоэнергетики. // Успехи современного естествознания, 2004, № 2, с. 173—174.
2. Каблов Е. Н., Кондрашов С. В., Юрков Г. Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013, том 8, № 3 — 4, с. 28—46

ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЙ ПОЛИМЕР НА ОСНОВЕ
2-КАРБОКСИПАРАЦИКЛОПРОПИЛСТИРОЛА И АКРИЛОНИТРИЛАС.Б. Мамедли¹, Р.В. Джафаров²¹Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; ipoma@science.az²Азербайджанский государственный экономический университет, Сумгайыт, Азербайджан»

Постоянно расширяются области использования оптических материалов. Одной из важнейших задач в области высокомолекулярных соединений является синтез новых полимеров оптического назначения с высокими физико-механическими свойствами, отвечающих определенным целевым назначениям.

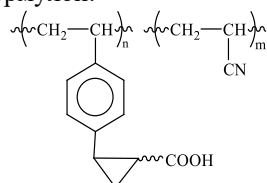
Проведенное исследование посвящено разработке сополимера 2-карбоксипара-циклопропилстирола (КЦПС) с акрилонитрилом (АН) оптического назначения. Функциональнозамещенные циклопропилстиролы имеют высокую степень сшивки и светопропускания, что увеличивает механическую прочность и оптические свойства синтезированного сополимера. Соплимер КЦПС+АН обладает более высокими физико-механическими показателями, чем сополимер ПС+АН. Получение сополимера на основе указанных мономеров происходит путем радикальной сополимеризации в массе и в растворе бензола в присутствии динитрилазодиизомасляной кислоты.

Синтез КЦПС осуществляли взаимодействием 2-метоксикарбонилпаратациклопропилстирола и безводного этанола в присутствии КОН при температуре 363–373 К в течение 6 часов, с последующим добавлением 10%-ного раствора HCl на продукт омыления. Выход 72%.

Полученный сополимер растворяется в диоксане, ацетоне, хлорированных углеводородах и др.

Состав и структура синтезированного сополимера установлены на основе элементного анализа и спектральных результатов. Результаты изучения процесса сополимеризации этих мономеров показали, что реакция протекает по двойным связям сомономеров без затрагивания циклопропанового кольца, карбоксильной и нитрильной группы.

Химическая структура сополимера выражается следующей формулой:



Для выяснения зависимости состава сополимеров от состава исходной смеси мономеров реакцию сополимеризации осуществляли при различных мольных соотношениях и КЦПС (M_1) и АН (M_2). Для создания сополимера с наиболее высоким светопропусканием оптимальным является отношение

КЦПС – АН в исходной мономерной смеси, равное 75:25. При более высоком содержании АН происходит окрашивание сополимера. Из-за образования хромоформных сопряженных связей ($C\equiv N$) продукт окрашивается. Состав сополимера определяли по данным карбоксильного числа.

Вычислены значения констант сополимеризации по Файнману-Россу ($r_1 = 0.7$, $r_2 = 0.15$) и Q-е параметры по Алфрею-Прайсу ($e_1 = -0.30$, $Q_1 = 0.267$).

Во всех случаях превращения сомономеров получают растворимые сополимеры, т.е. при сополимеризации M_1 и M_2 практически не происходят процессы передачи цепи на полимер или структурирования. С ростом содержания циклопропилстирольных фрагментов увеличиваются адгезионные свойства сополимера. Значения констант относительной активности мономеров свидетельствуют о высокой реакционной способности КЦПС, по сравнению с АН ($r_1 > r_2$).

Значение произведения величины констант сополимеризации ($r_1 \cdot r_2 < 1$), указывает на склонность мономерных звеньев к чередованию.

Установлено, что сополимер, полученный на основе данных мономеров КЦПС+АН, проявляет более высокую оптическую прозрачность ($n_D^{20} = 1.5780$), чем сополимер полистирола с акрилонитрилом (1.568—1.570) [1]. Скорее всего это связано с наличием в звеньях макромолекулы циклопропанового кольца, а также карбонильного фрагмента.

Выявлено, что светопропускание полученного сополимера составляет около 80%. Относительной чертой полученного сополимера являются его высокие физико-механические и адгезионные свойства.

В результате проведенных исследований был получен оптический материал, проявляющий высокую оптическую прозрачность и светопропускания.

Сополимер 2-карбоксипара-циклопропил-стирола с акрилонитрилом оптического назначения может быть использован в качестве оптически прозрачного материала в оптотехнологии, а также в процессах при изготовлении оптической детали к интегральным микросхемам других оптических изделий.

1. Э.И. Шепурев, В.Г. Рупышев, В.М. Гальперин, Н.Б. Карглазова и др. Оптико-механическая промышленность — 1977, № 11, с. 36—37

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИКАРБАЗОЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

В.М. Акулова¹, Г.Б. Мельникова¹, А.Д. Замковец², С.А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; galachka@gmail.com

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Создание тонких покрытий поливинилкарбазола (ПВК) с заданными оптическими свойствами является актуальной задачей, решение которой позволит улучшить эксплуатационные характеристики таких устройств, как светодиоды, химические сенсоры и солнечные батареи. К важнейшим оптическим свойствам ПВК относят высокий показатель преломления, высокое разрешение и низкое оптическое поглощение в видимой и инфракрасной областях.

Цель — изучить структуру и свойства композиционных полимерных пленок ПВК.

Материалы и методы исследования. Пленки ПВК и ПВК с наночастицами диоксида кремния ($d=10-20$ nm, Sigma-Aldrich), были сформированы на очищенных предметных стеклах методами Ленгмюра — Блоджетт (горизонтальный и вертикальный тип выделения) и спин-коутинга. Пленки ПВК выделяли из растворов (Поли-9-винилкарбазол, $M_w = 1\,100\,000$, Sigma-Aldrich) в хлороформе с концентрацией 0,5 мг/мл при давлении 30 мН/м. ЛБ-пленку ПВК с наночастицами оксида кремния формировали из растворов ПВК ($c = 1$ мг/мл) и диоксида кремния в хлороформе ($C = 1$ мг/мл), смешанных в количественном соотношении 1 : $2 \cdot 10^4$ моль, соответственно. В случае нанесения пленок ($c = 0,5$ мг/мл) методом спин-коутинга скорость вращения подложки составляла 8000 rpm в течение 2 мин.

Изучение структуры полученных пленок проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, NT-206, Республика Беларусь) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов NSC 35 с жесткостью 4 Н/м, радиус кривизны зонда составлял не более 10 нм.

Спектры пропускания записывались на спектрофотометре Cary 500 (Varian Inc., США), спектры зеркального отражения — на спектрофотометре MC122 (SOLinstruments, Республика Беларусь). Угол падения при записи спектров отражения составлял 10° в диапазоне длин волн от 190 до 1200 нм.

Краевой угол смачивания определяли методом неподвижной капли на установке DSA100 E (KRUS, Германия).

Результаты и их обсуждение. Для пленок ПВК, сформированных ЛБ-методом, характерна однородная плотная структура поверхности (рис. 1). Методом спин-коутинга образуется слой частиц неправильной округлой формы диаметром от 150 до 400 нм. Добавление наночастиц оксида кремния приводит к уменьшению полимерных структур до 200 нм. Аналогичным образом наночастицы вклю-

чены внутрь полимерной матрицы при формировании ЛБ-слоев вертикальным способом. Для горизонтального характерно неравномерное распределение оксида кремния по поверхности ПВК.

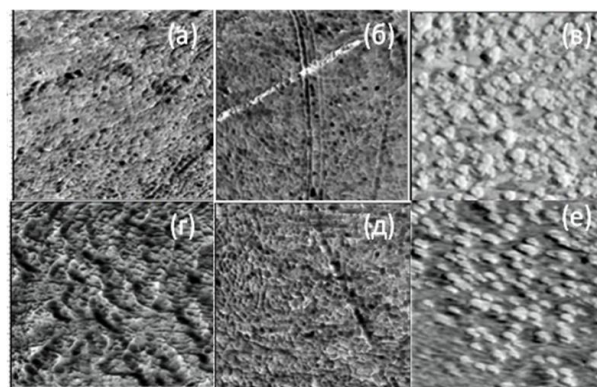


Рис. 1. АСМ-изображения (6 x 6 мкм) структуры в режиме «Top-sion» пленок ПВК (а-в) и ПВК с наночастицами оксида кремния (г-е), полученных различными методами нанесения. а, г — вертикальный тип ЛБ; б, д — горизонтальный тип ЛБ; в, е — спин-коутинг

Краевой угол смачивания для всех типов пленок составил 60° . Пленки, сформированные методом спин-коутинга из суспензий с концентрацией 1 мг/мл, образуют более плотные пленки и краевой угол смачивания увеличивается до 90° . Для пленок, полученных горизонтальным ЛБ-методом, толщина составляет 12 нм, в остальных случаях от 70 до 100 нм. Установлено, что с увеличением толщины пленок с 11 до 70 нм уменьшается светопропускание модифицированных образцов стекла на 5%. Добавление наночастиц диоксида кремния не влияет на светорассеяние. Особый интерес представляют данные светопропускания пленки чистого ПВК, полученной вертикальным ЛБ-методом. Согласно полученным данным, эта пленка пропускает 100% излучения, но при этом имеет место и его отражение.

Заключение. Увеличение толщины пленок ПВК, приводит к уменьшению их светорассеивающей способности. Кроме того, добавление наночастиц диоксида кремния в полимерную матрицу не оказывает влияния на светорассеивающую способность пленок ПВК. Была получена пленка чистого ПВК со 100% пропускающей способностью, при этом демонстрирующая отражение света.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии», зад. 2.82.

СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПАРА-ДИ-(2-ЭТОКСИКАРБОНИЛЦИКЛОПРОПИЛ)БЕНЗОЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО В СОСТАВЕ ПВХ-КОМПОЗИЦИИ

Х.Г. Назаралиев, С.Д. Гаджиева, М.А. Абдурахманова, А.Г. Алиева

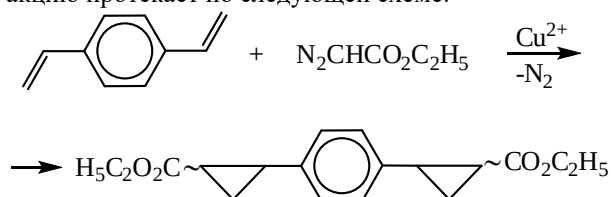
Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан

Полимеры, содержащие в своих макромолекулах функционально-активные группы, расположенные вдоль основной цепи, занимают особое место среди высокомолекулярных соединений. Важнейшей особенностью таких полимеров является то, что наличие в их составе функциональных групп различной химической природы придает им ряд специфических свойств: биологическую активность, повышенную адгезию, тепло- и морозостойкость, эластичность и т.д.

Одним из таких полимеров является промышленно производимый поливинилхлорид (ПВХ). ПВХ широко применяется в производстве товаров бытового назначения, например, в качестве тары для хранения и транспортировки различных жидкостей, в сельском хозяйстве, в производстве электроизоляционных материалов, строительстве и т.д. На основе ПВХ также получают многие полимерные композиционные материалы для изготовления рам окон и дверей, плинтусов, покрытий для полов, водосточных желобов и труб, элементов сантехнического оборудования, для устройства теплиц и т.д. Однако изделия из ПВХ в самостоятельном виде редко используются. Его используют, как правило, в составе многочисленных композиций с добавлением ингредиентов различного назначения, большую часть которых составляют пластификаторы и стабилизаторы [1, 2].

В представленной работе осуществлен синтез этилового эфира циклопропанкарбоновой кислоты в качестве биоцидного пластификатора ароматического ряда, а также изучены его свойства в составе композиций на основе ПВХ.

Для получения намеченного соединения осуществлена реакция *пара*-дивинилбензола с этиловым эфиром диазоуксусной кислоты в условиях, аналогичных описанным ранее в литературе [3]: ЭДАУ:*пара*-ДВБ в соотношении 2:1 в присутствии каталитического количества безводного CuSO_4 . Реакцию протекает по следующей схеме:



За ходом реакции следили по выделению свободного азота (по окончании реакции реакционную массу нагревали при той же температуре еще один час). Чистота полученных соединений контролировалась методом ГЖХ-анализа.

Состав и структура синтезированных соединений были установлены на основании ИК- и ПМР-спектров, ГЖХ и элементного анализа.

Полученное соединение *пара*-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)бензол испытано в качестве пластификатора (в чистом виде и в смеси с диоктилфталатом) в составе ПВХ в количестве 20—40 мас. %.

Было выявлено, что в присутствии нового соединения улучшаются физико-механические и теплофизические свойства полученных композиций на основе ПВХ. Вместе с тем выяснено, что в присутствии *пара*-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)бензола полученные композиции обладают биоцидными свойствами, что можно объяснить наличием в структуре синтезированного соединения циклопропановой группы. Приготовленные из композиций пленки были испытаны на противомикробную активность. Изучение антимикробной активности разработанных композиций проводили путем определения их грибоустойчивости с применением суспензий грибов вида *Aspergillus niger* и *Candida albicans*.

Композиции на основе ПВХ, полученные с использованием диоктилфталата совместно с синтезированным циклопропансодержащим мономером в качестве биоцидного пластификатора, помимо биологической активности, имеют также высокие эксплуатационные характеристики: они обладают улучшенными физико-механическими показателями, в том числе и низкой морозостойкостью.

Результаты испытаний показали, что полученные композиции можно использовать при изготовлении товаров бытового назначения.

1. Шахназарли Р.З. Биоцидные добавки для поливинилхлорида на основе винилциклопропиловых эфиров. // European Science Review. 2014, № 2, с. 35—39
2. Lagaron J.M., Ocio M.J., Lopez-Rubio A. / (Eds): Antimicrobial Polymers, Wiley-VCH, Hoboken, New Jersey, 2012, XI. P. 596
3. Гулиев К.Г., Назаралиев Х.Г., Гулиев А.М. Синтез и полимеризация п-(2-функциональнозамещенных) циклопропилстиролов. // Азерб. Хим. Журнал, 1999, № 1, с. 87—90

НАБУХАНИЕ СШИТОГО СОПОЛИМЕРА АКРИЛАМИДА И АКРИЛАТА НАТРИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ МЕДИ (II) С ДОБАВКАМИ АМИНОКИСЛОТ

Д.Л. Кудрявский¹, Е.К. Фомина², О.В. Якименко¹, Е.В. Гринюк¹, М.В. Ласминская¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; famina@bsu.by

Цель. Оценить возможность образования комплексов ионов Cu(II) с функциональными группами сшитого сополимера (СП) акриламида (АА) и акрилата натрия (АNa) в водных растворах солей Cu(II) с добавками протеиногенных аминокислот в качестве конкурирующих лигандов. Данное исследование представляет интерес для растениеводства, где смешанные комплексы биогенных *d*-металлов могут применяться в качестве микроудобрений пролонгированного действия.

Материалы и методы. Использовали промышленный СП АА и АNa с мольной долей звеньев АNa, равной 0,85. Водно-солевые растворы СП 49%-ной концентрации с добавкой в качестве сшивающего агента 10% пероксодисульфата Na нагревали 2 ч при 90 °С. Полученный сшитый СП очищали от низкомолекулярных примесей посредством диализа и высушивали при 50 °С.

Набухание гидрогеля на основе СП проводилось в водных растворах 0,01 М CuCl₂ и 0,04 М аминокислот: глицина, *L*-гистидина, *L*-метионина, а также 0,025 М KCl при pH 3, 5 и 7. Степень набухания установили гравиметрически. Количество ионов Cu(II), поглощаемых сшитым СП, определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В водном растворе CuCl₂ степень набухания гидрогеля на основе СП АА и АNa существенно снижается по сравнению с его степенью набухания в растворе KCl той же ионной силы (табл. 1). Это может быть обусловлено образованием между макромолекулами дополнительных сшивков, узлами которых являются ионы Cu(II), координационно связанные с карбоксилатными группами СП.

При добавлении аминокислот степень набухания гидрогеля в растворах CuCl₂ повышается, что можно объяснить образованием более устойчивых связей ионов Cu(II) с функциональными группами аминокислот по сравнению с COO⁻ группой СП. Чем больше ионов Cu(II) поглощает гидрогель из водных растворов CuCl₂ с добавками аминокислот (табл. 2), тем меньше он набухает.

Кроме того, степень набухания гидрогеля становится меньше при снижении pH для всех растворов. Это связано с переходом части заряженных COO⁻ групп СП в незаряженные COOH. В свою очередь, молекулы аминокислот, которые являются амфолитами, в зависимости от pH могут быть катионами, биполярными ионами или анионами, что также влияет на степень набухания гидрогеля.

Например, гистидин при pH 3 является преимущественно катионом и образует неустойчивый комплекс с Cu(II), что приводит к конкуренции COO⁻ групп сополимера за ион Cu(II). В результате, степень набухания гидрогеля в растворе CuCl₂ с добавкой гистидина при pH 3 остается такой же, как и в растворе CuCl₂ той же кислотности.

Таблица 1. Степень набухания гидрогеля в различных средах

Состав раствора	pH	Степень набухания, г/г геля
0,025 М KCl	3	87±1
0,025 М KCl	5	90±1
0,025 М KCl	7	94±3
0,01 М CuCl ₂	3	54±2
0,01 М CuCl ₂	5	57±6
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М глицина	3	75±6
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М глицина	5	80±4
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М глицина	7	80±7
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -гистидина	3	53±4
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -гистидина	5	75±3
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -гистидина	7	81±1
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -метионина	3	76±2

Таблица 2. Количество ионов Cu(II), поглощенных гидрогелем в различных средах

Состав раствора	pH	Cu ²⁺ поглощено, ммоль/г геля
0,01 М CuCl ₂	3	1,187±0,011
0,01 М CuCl ₂	5	1,189±0,012
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М глицина	3	0,686±0,005
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М глицина	5	0,355±0,004
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М глицина	7	0,198±0,002
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -гистидина	3	0,592±0,004
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -гистидина	5	0,421±0,004
0,01 М CuCl ₂ + 0,04 М <i>L</i> -гистидина	7	0,036±0,001

Таким образом, в водных растворах солей Cu(II) с добавками аминокислот возможность образования химических связей ионов Cu(II) с сшитым сополимером АА и АNa и устойчивость этих связей определяются природой аминокислоты и кислотностью среды. Не исключено формирование разнوليгандных комплексов Cu(II) с функциональными группами сополимера и глицина, а также сополимера и *L*-гистидина при pH 3 и 5.

МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СМЕШАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ МЕДИ (II) С СОПОЛИМЕРОМ АКРИЛАМИДА И АКРИЛАТА НАТРИЯ И АМИНОКИСЛОТАМИ

Е.К. Фомина¹, Д.Л. Кудрявский², Г.В. Бутовская¹,
Л.Ю. Тычинская³, Е.Д. Скаковский³, Р.Л. Свердлов²

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; famina@bsu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Сополимер (СП) акриламида (АА) и акрилата натрия (АNa) часто используется как пленкообразующий и адгезионно-активный компонент в составе микроудобрений, содержащих биогенные *d*-металлы, в том числе Cu(II). Микроудобрения могут содержать и *L*-аминокислоты, которые защищают растения при действии стрессовых факторов (холод, засуха и т. п.). Известно, что карбоксилатные группы сополимера образуют координационные связи с ионами Cu(II), что приводит к пролонгированному высвобождению катиона металла из полимерной матрицы [1], а COOH и NH₂-группы аминокислот также являются лигандами для ионов биогенных металлов. Поэтому не исключено формирование смешанных комплексов ионов Cu(II) с сополимером и аминокислотами.

Цель. Определить влияние природы аминокислоты и pH водных растворов на возможность образования смешанных комплексов ионов Cu(II) с функциональными группами сополимера АА и АNa и некоторых аминокислот.

Материалы и методы. Использовали промышленный СП АА и АNa с мольной долей звеньев АNa, равной 0,85.

За формированием смешанных комплексов в водных растворах CuCl₂ с добавками глицина (Gly), *L*-гистидина (His), *L*-лизина (Lis) и СП следили методами абсорбционной спектрофотометрии, спектроскопии ЭПР, ЯМР ¹³C, Фурье-ИК.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Установлено, что при добавлении к водным растворам комплексов Cu(II) с аминокислотами (Gly или His или Lis) дополнительно полимерного лиганда (СП АА и АNa) при мольных отношениях Cu(II) : COO⁻ СП : аминокислота = 1 : 4 : 4 формируются смешанные комплексы, о чем свидетельствует появление в электронных спектрах поглощения новых полос, отличающихся от полос поглощения спектров водных растворов монолигандных комплексов ионов Cu(II) с аминокислотами, а также ионов Cu(II) с СП. Определено, что наиболее устойчивый смешанный комплекс ионов Cu(II) с СП и Gly образуется при pH 5, поскольку в электронных спектрах поглощения наблюдается значительный bathochromic сдвиг (от 640 к 690 нм) и увеличение интенсивности полосы поглощения при переходе от

комплекса Cu(II)–аминокислота к смешанному. Возможность образования разнолигандного комплекса в значительной степени зависит от распределения заряда на макромолекулах полиэлектролита и молекулах аминокислоты, являющейся амфолитом. Около 80% карбоксильных групп сополимера диссоциированы при pH 5 (в соответствии с установленным значением pK_a), что существенно увеличивает его комплексообразующую способность. Молекулы глицина при этом значении pH близки к изоэлектрической точке и существуют преимущественно в виде биполярного цвиттер-иона.

Методом ЯМР ¹³C обнаружено, что при добавлении парамагнитных ионов Cu(II) к раствору СП и глицина при мольных отношениях Cu(II) : COO⁻ СП : Gly = 1 : 80 : 80 (при pH 5) наблюдается значительный парамагнитный сдвиг сигналов, относящихся к атомам углерода карбоксилатной группы и связанной с ней метиновой группы акрилатного звена СП, а также существенное уширение сигналов атомов углерода как карбоксильных, так и метиленовых групп глицина. Это свидетельствует о том, что роль лигандов при образовании смешанного комплекса выполняют группы COO⁻ сополимера, а также карбоксильные и NH₂-группы аминокислоты.

В Фурье-ИК спектрах сополимера, глицина, комплексов ионов Cu(II) с сополимером, ионов Cu(II) с глицином и смешанного комплекса определены значения волновых чисел валентных асимметричных (ν_a) и симметричных (ν_s) колебаний связи C=O карбоксильной группы. Изменения значений ν_a и ν_s в спектрах смешанных комплексов по сравнению со спектрами лигандов говорят об участии карбоксильной группы как СП, так и глицина в образовании координационных связей с ионом Cu(II) в смешанном комплексе и подтверждают выводы, сделанные по результатам спектроскопии ЯМР ¹³C.

Методом ЭПР-спектроскопии установлено, что образующиеся смешанные комплексы ионов Cu(II) с СП и аминокислотами являются двуядерными при pH 5 в отличие от pH 7.

1. Фомина Е.К., Круль Л.П., Гринюк Е.В., Поликарпов А.П., Якименко О.В. Переход ионов меди из пленок на основе гидролизата полиакрилонитрильного волокна в водную фазу // Вес. НАН Беларусі. Сер. хім. навук. — 2016, № 1, С. 68—73

НЕГАТИВНЫЕ ФОТОРЕЗИСТЫ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ 2-ГЛИЦИДИЛОКСИКАРБОНИЛ 1-(ВИНИЛФЕНИЛ)ЦИКЛОПРОПАНА С 2,3-ДИМЕТИЛБУТАДИЕНОМ-1,3

К.Г. Гулиев¹, У.А. Хамедова¹, Р.В. Джафаров², Р.М. Рзаев²

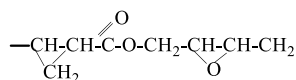
¹Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, Сумгайыт, Азербайджан; ipoma@science.az

²Азербайджанский государственный экономический университет, Сумгайыт, Азербайджан

Мономеры, содержащие эпоксидные фрагменты в боковых цепях, обладают ценным комплексом свойств и применяются для создания различных композиций и пленкообразующих соединений.

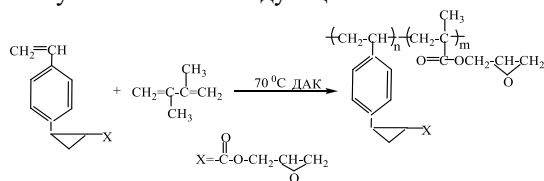
Данная работа посвящена исследованию сополимеризации 2-глицидилокси карбонил -1-(п-винилфенил)циклопропана с 2,3-диметил бутадие-1,3-ом и изучению структуры и свойства сополимера полученных на их основе с целью создания новых фоточувствительных сополимеров.

Сополимеризацию (ГВФЦ с 2,3-диметил-бутадие-1,3) проводили как в массе, так и в растворе бензола под действием ДАК изучали дилотометрически. При всех изученных составах исходных мономерных смесей реакция протекает без идентичного периода с постоянной начальной скоростью. ГВФЦС был синтезирован согласно методике, приведенной [1], образовавшиеся сополимеры очищали двукратным осаждением из бензольных растворов серным эфиром и сушили при 30 °С в вакууме 30 мм.рт.ст. По данным спектроскопии сополимеризация ГВФЦСТ со 2,3 диметилбутадие-1,3-ом протекает только за счет раскрытия двойных связей винильных групп с сохранением остальных реакционноспособных функциональных фрагментов



Химическая структура сополимера установлена на основе результатов ИК- и ПМР-спектроскопических анализов.

На основании спектральных анализов можно заключить, что сополимеризация этих мономеров реализуется по ниже следующей схеме:



Турбодиметрическое титрование свидетельствует об образовании истинных сополимеров при любом исходном соотношении мономеров. Константы сополимеризации ($r_1 = 0.20$: $r_2 = 0.60$) определены по методу Файнмана-Росса и параметры Q-е по Алфрею и Прайсу. Состав сополимера определяли по

данным анализа эпоксидного числа. Характеристическую вязкость определяли в бензоле в вискозиметре Уббелюде и составляла $[\eta] = 0.95\text{—}1.0$ дл/г.

Синтезированные полифункциональные сополимеры позволяют синтезировать новые циклопропан и эпоксисодержащие реакционноспособные группы полимера с различным содержанием реак-

ционноспособных групп

и внутренней двойной связи. Т.е. варьируя условия синтеза можно целенаправленно регулировать состав и следовательно, физикомеханические, теплофизические, а также адгезионные и др. свойства сополимеров. Выявлено, что в составе сополимера происходят заметные изменения прочностных и адгезионных свойств сополимеров.

Показано, что адгезионная прочность меняется в интервале 7,8—17,8 МПа в зависимости от состава сополимера. В то же время обогащение в составе

сополимера

звеньями сопровождается улучшением эластичных свойств. Такие характеристики сополимера позволяют получать из них глицидиловые пленки с малой микродефектностью.

Таким образом, наличие в макромолекулах полученного сополимера циклопропанного кольца, эпоксидного числа, а также двойной связи позволило создать на базе сополимера материал с высокой фоточувствительностью 56 см²/Дж.

На основании проведенных исследований можно заключить, что наличие в структуре нового синтезированного сополимера с реакционноспособными фрагментами обеспечивает этому сополимеру высокую фоточувствительность, создание твердого, эластичного слоя с хорошей адгезией к подложкам и малой микродефектностью плёнок полимеров.

Синтезированные полифункциональные сополимеры на основе 2-глицидилокси карбонил -1-(п-винилфенил) циклопропана с 2,3- бутадие-1,3-ом позволяют синтезировать новые циклопропан и эпоксисодержащие полимеры.

1. Гулиев К. Г., Пономарёва Г.З., Гулиев А. М. Синтез и свойства эпоксисодержащих полициклопропилстиролов. // Высокмолек. соедин. 2007, Т. 49, № 8, с. 1571—1581.

ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА И КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ С ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИМ ЭФФЕКТОМ

В.О. Шабловский, А.В. Тучковская, И.А. Климовцова, В.А. Рухля, О.Г. Пап

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь shablovski @bsu.by

В настоящее время в качестве технологических вспомогательных средств для антимикробной обработки пищевых продуктов, таких как колбасы и сыры, используются полимерные композиции, включающие в себя антибиотики (например, натамицин), или консерванты, ограничено разрешенные к использованию (например, дигидрацетовая кислота).

Цель работы — разработка экологически безопасной антибактериальной и антифунгицидной композиции, включающей природные полимеры, модифицированные сбалансированной синергетической смесью регуляторов кислотности, антиокислителей, стабилизаторов, загустителей, комплексообразователей, а также влагоудерживающих агентов.

В качестве полимера был использован хитозан различной молекулярной массы. Изучались композиции низкомолекулярного водорастворимого хитозана (ВХ) и высокомолекулярного кислоторастворимого хитозана (КХ) с органическими карбоновыми кислотами: винной, яблочной, янтарной, лимонной и молочной.

При обработке растворами хитозана на поверхности изделий формируются прочные однородные пленки. Такие пленки защищают пищевой продукт от потерь массы (за счет уменьшения скорости испарения влаги) и создают определенный барьер проникновению кислорода и других веществ извне.

Кроме того, благодаря наличию свободных аминогрупп хитозан может взаимодействовать с мембранами клеток бактерий и грибов, что придает ему антимикробные свойства.

В состав хитозановых пленок вводились также различные наполнители и функциональные добавки (поглотители кислорода, адсорбенты влаги, препараты, обладающие фунгицидной и бактерицидной активностью и т.п.) Такие добавки должны быть разрешены к применению при производстве пищевых продуктов согласно Техрегламента Таможенного союза ТР-ТС 029/1012. В качестве функциональных добавок использованы природные эмульгаторы, пластификаторы (например, полиглицколи), антиокислители, такие как аскорбиновая кислота и т.п.

Для защитных пленок, применяемых в пищевой промышленности, необходимым качеством является способность подавлять рост грибов и плесеней, образующихся в процессе хранения готовой продукции. Для количественной оценки бактериостатического и фунгистатического эффектов композиций на основе хитозанов были проведены их микробиологические испытания. В качестве тест объек-

тов были выбраны культуры, указанные в таблице.

Результаты микробиологических испытаний композиций хитозанов и карбоновых кислот проиллюстрированы таблицей.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Прочность связывания карбоновых кислот с хитозаном увеличивается с увеличением его молекулярной массы, а бактерицидная активность таких полимерных композиций, в свою очередь повышается с уменьшением полимеризации полисахарида.

Вследствие синергетического эффекта минимальные ингибирующие концентрации полученных материалов существенно ниже, чем для индивидуальных ингредиентов.

Таблица. Антимикробная активность композиций на основе хитозанов и карбоновых кислот

№ композиции**	Диаметр отсутствия роста культуры (Ø мм)*				
	E. coli	Ps.aeruginosa	St.aureus	C.albicans	B. subtilis
0-1	11	8	8	11	8-8,5
1-1	13—14	14—15	13—13,5	14	14
2-1	15	13,5—14	13—14	14—14,5	15
3-1	16	17,5—18	13—14	14,5—15	15—15,5
3-2	13—14	15	8	11,5—12	12
4-1	15	17	14—15	12	13—13,5
4-2	16—17	12—13	20,5—21	10	21
5-1	15—16	16,5—17	12	14,5	14—15
5-2	15	16—16,5	13—13,5	11	11—11,5
Контроль	8	8	8	8	8

* — в том числе диаметр лунки — 8 мм;

** — 0-1 — водорастворимый хитозан (ВХ); 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1 — композиции ВХ с винной, яблочной, янтарной, лимонной и молочной кислотами; 3-2, 4-2, 5-2 — композиции кислоторастворимого хитозана (КХ) с янтарной, лимонной и молочной кислотами.

Иммобилизованные формы антимикробных добавок (органических кислот) обладают рядом преимуществ по сравнению с их низкомолекулярными аналогами, а именно:

- постоянным пролонгированным выделением биоцидной добавки из полимерного комплекса в течение всего срока хранения пищевого продукта;
- выбором уровня дозирования антисептиков из технологического вспомогательного средства;
- более широким спектром антимикробного действия полимерной композиции и ее большей эффективностью по сравнению с используемыми в настоящее время зарубежными препаратами.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ АЛКИДНОГО ОЛИГОМЕРА В РЕАКЦИИ СОПОЛИМЕРИЗАЦИИ СО СТИРОЛОМ

Е.И. Яблонская, Н.Р. Прокопчук

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; VPSH_bstu@mail.ru

Получение гомогенных продуктов сополимеризации алкидных олигомеров (АО) со стиролом (без содержания полистирола) сопряжено с рядом трудностей. Эти сополимеры получаются гомогенными лишь в том случае, если в состав рецептур алкидных пленкообразователей входит достаточное количество жирнокислотных радикалов, обладающих сопряженными двойными связями. Поэтому в реакции сополимеризации со стиролом реакционная способность АО определяется наличием сопряженных двойных связей.

Для разработки рецептуры алкидно-стирольного пленкообразователя синтезирован новый пентафталевый АО, модифицированный дегидратированным касторовым маслом, с жирностью 70% (ПФ-ДКМ-70). Выбор в качестве модификатора дегидратированного касторового масла обусловлен тем, что оно имеет высокое значение йодного числа (ИЧ), т.е. оно обладает высокой степенью ненасыщенности.

Цель работы — исследовать реакционную способность нового АО в реакции сополимеризации со стиролом, получить их сополимеры и исследовать эксплуатационные свойства алкидно-стирольного лака и покрытий на его основе.

Исследовать реакционную способность синтезированного АО предложено методом ИК-спектроскопии. ИК-спектр снят на ИК-Фурье микроскопе Nicolet iN 10 (Thermo Scientific, США). На рисунке 1 представлена часть ИК-спектра алкидной смолы ПФ-ДКМ-70 в области 2000—500 см^{-1} .

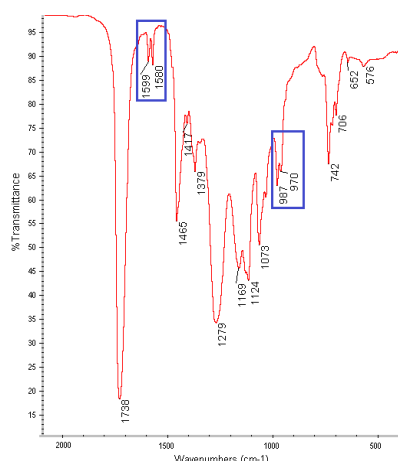


Рис. 1. ИК-спектр алкидного олигомера ПФ-ДКМ-70

Известно [1], в ИК-спектрах для сопряженных диенов в области 1650—1600 см^{-1} наблюдаются две более интенсивные по сравнению с изолированными двойными связями полосы. Также для обнаружения сопряженной двойной связи ищут полосу поглощения в области 990—970 см^{-1} , принадлежащую транс-двойной связи в

сопряженной системе.

На рис. 1 видна полоса поглощения с пиками 987 см^{-1} и 970 см^{-1} , что свидетельствует о наличии транс-транс конъюгированных диенов. Также в спектре наблюдается немного смещенная полоса поглощения при 1599 см^{-1} , 1580 см^{-1} , которую можно отнести к валентным колебаниям С=С сопряженной двойной связи в жирнокислотном остатке дегидратированного касторового масла.

Кроме того, реакционную способность АО оценивали с помощью ИЧ. Установлено, что ПФ-ДКМ-70 характеризуется ИЧ не менее 70 г I_2 / 100 г. Определение ИЧ осуществляли по ГОСТ 2070-82, метод А (спиртовым раствором I_2). При определении ИЧ согласно этой методике присоединение галогенов (йода) протекает не количественно: галогены присоединяются к одной из двух сопряженных связей в случае диеновых кислот, тем самым этот метод косвенно характеризует количество сопряженных связей.

Таким образом, методом ИК-спектроскопии и определения ИЧ подтверждено, что ПФ-ДКМ-70 обладает системой сопряженных двойных связей, т.е. характеризуется повышенной реакционной способностью и пригоден для успешной сополимеризации со стиролом. Полученные результаты позволили оптимизировать разработку рецептуры алкидно-стирольного пленкообразователя.

В лаборатории на кафедре полимерных композиционных материалов получены гомогенные продукты сополимеризации стирола с новым алкидным пленкообразователем ПФ-ДКМ-70. Исследованы технологические свойства синтезированного алкидно-стирольного лака (ПФ-ДКМ-70-С) и покрытий на его основе. Полученный в лабораторных условиях алкидно-стирольный лак представляет собой однородную прозрачную жидкость, которая обладает светлым цветом (цвет по йодометрической шкале, не более 50 мг I_2 /100 см^3). Покрытия на основе ПФ-ДКМ-70-С характеризуются высокой прочностью пленки при ударе (не менее 55 см), а также высокой твердостью пленки по маятниковому прибору ТМЛ (маятник А, не менее 0,25 отн. ед.). При естественных условиях покрытия на основе разработанного алкидно-стирольного олигомера высыхают до степени 3 не более чем за 1,2 ч. Таким образом, синтезированный алкидно-стирольный лак не уступает по свойствам импортным промышленным лакам.

1. Щербина А. Э. Органическая химия. Идентификация и системный структурный анализ органических соединений. — Минск: БГТУ. — 2005.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 2

Трибология

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2019)

25—28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь

STATISTICAL APPROACHES TO CONTACT BETWEEN ROUGH ELASTIC SOLIDS

F.M. Borodich¹ and A. Pepelyshev¹¹School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA, UK, BorodichFM@cardiff.ac.uk²School of Mathematics, Cardiff University, Cardiff, CF24 4AG, UK, PepelyshevAN@cardiff.ac.uk

Introduction. Topography of surfaces may influence many processes in tribology including friction and adhesion. The construction of efficient statistically justified multiscale for describing problem of contact between rough elastic surfaces, is a very challenging problem. The recent international competition "Contact Mechanics Challenge" [1] has confirmed its timeliness. This research competition was designed to test various approximate approaches for solving this problem. Although many international groups took part in this 'contact sport of rough surfaces', the results were not very impressive. Carpick has correctly noted [1]: *for more realistic rough surfaces, the problem becomes a multiscale exercise in surface-height statistics, even before including complex phenomena such as adhesion, plasticity, and fracture*. Thus, although no convincing models so far have been presented, the international scientific community realizes that proper statistical approaches to surface roughness and modelling of contact between the surfaces are of great practical interest for almost all areas of modern tribology.

Theory and tests of normality. The influence of surface topography is usually taken into account in various statistical models of contact. Most of these models are based on an explicit or implicit assumption of normality of the asperity heights or similar assumptions that involve Gaussian (normal) distributions. Using the experimental data obtained, the assumption of the normal distribution for the roughness heights has been studied by application of various modern tests of normality. The main normality tests are the following: Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors, Shapiro–Wilk, Anderson–Darling, Cramer–von Mises, the Pearson, and Shapiro–Francia. Each normality gives a quantitative estimation of proximity between an observed sample of measurements and the theoretical normal distribution, i.e. one can check if the height distribution of the tested surfaces follows the normal distribution.

We used topography data for some grinding metallic surfaces [2] and surfaces of intact carbon-based coatings deposited by direct current pulsed magnetron sputtering with and without substrate bias voltage are normal at micro and nano-scales [3]. For these surfaces, first the heights of the nano-asperities were determined by AFM (Atomic Force Microscopy), and the heights of the micro-asperities were measured by a profilometre (a

stylus). It has been shown that the height distribution of grinding surfaces are not Gaussian at both nano and micro-scales [2], while roughness of the carbon-based coatings was Gaussian at both scales [3]. In addition, epoxy resin replicas of polishing papers having nominal asperity sizes up to several micrometers were measured by white light interferometry. Topography of the intact surfaces of the replicas was also Gaussian [4].

Simulations of contact. The further development of a concept of the Statistically Representative Pattern of Surface Roughness (SRPSR) recently introduced by authors [5] enabled us to use a version of statistically justified representation of the surfaces for numerical simulations of their contact. Using a version of the PK algorithm, we study here contact between spherical surfaces with superimposed roughness topography measured on different surfaces.

Conclusion. It is shown that topography of intact surfaces of carbon-based coatings and some surfaces whose load history has no rubbing loads, is Gaussian at both micro and nano-scales. Hence, some of the standard statistical models of contact between rough solids can be applied to these intact surfaces. However, practically no current statistical models of contact between rough surfaces can be even formally applied to grinding surfaces. The introduction of the SRPSR concept, its development and implementation in Polonsky–Keer type numerical solvers makes a first step towards the construction of efficient statistically justified multiscale methodology bridging directly nanomechanics to continuum mechanics for describing problem of contact between rough elastic surfaces.

1. Carpick R.W. (2018) The contact sport of rough surfaces. *Science*, 359(6371), 38.
2. Borodich F.M. et al. (2016) Statistical approaches to description of rough engineering surfaces at nano and micro-scales. *Trib. Int.* 103, 197—207.
3. Borodich F.M. et al. (2019) Roughness of deposited carbon-based coatings and its statistical characteristics at nano and micro-scales. *Frontiers Mech. Eng. Tribology* (accepted).
4. Pepelyshev A. et al. (2018) Adhesion of soft materials to rough surfaces: Experimental studies, statistical analysis and modelling. *Coatings*. 8, 350; doi:10.3390/coatings8100350.
5. Borodich F.M. et al. (2015) Micro and nano scale statistical properties of rough surfaces of significance in their friction. In: *Proc.6th VIENNANO '15*. eds. / W.J. Bartz; F. Franek, The Austrian Trib. Soc., (OETG), Wiener Neustadt, 13—14. ISBN 978-3-901657-52-8.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ПОВРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

М.В. Зернин

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, zerninmv@mail.ru

Постановка задач и методы их решения. В подшипниках скольжения (ПС) возможна реализация различных режимов смазывания поверхностей (от жидкостного до граничного) и проявление повреждений различного типа (изнашивание по различным механизмам и усталостное повреждение от циклических напряжений).

В Брянском государственном техническом университете моделирование взаимодействия поверхностей осуществляется по МКЭ на основе механики «контактной псевдосреды», позволяющей учесть многие типы нелинейностей «третьего тела». Разработан [1, 2] «комбинированный» алгоритм решения нелинейных задач, сходящийся практически для любых типов нелинейных свойств, в том числе и при скачкообразном их изменении. Моделирование течения жидкости в зазоре ПС также осуществляется по МКЭ [2, 3] с учетом многих факторов.

На основе таких расчетов можно выполнить оценки пригодности антифрикционных материалов (АФМ) для выявленных условий эксплуатации. Это ограничения применимости АФМ, такие как: допустимое среднее $[p]$ или максимальное $[p_{max}]$ давление, минимальная толщина зазора $[h_{min}]$, допустимая скорость относительного скольжения поверхностей $[V]$, комплексные критерии типа $[pV]$ и другие.

Ранее автором была предложена [2, 4] методика расчетной оценки долговечности ПС с учетом усталостных и износоконтактных повреждений. Теоретической основой расчетов поврежденности является обобщенная модель В.В. Болотина [5] накопления повреждений и разрушения материала. Методика основана на пространственной и временной дискретизации процессов накопления повреждений различного вида. Для отдельных дискретных участков возможно применение разных моделей накопления повреждений, описывающих различные виды изнашивания и усталостное повреждение материала. Фактически реализуется прямое (явное) моделирование повреждающих процессов и их совместного воздействия.

В ходе расчета отслеживаются различные критерии усталостного повреждения: предельная поврежденность какой-то площадки на поверхности, появление макротрещины или системы макротрещин заданной длины, выкрашивание участков АФС. Отслеживаются также многие критерии предельного износа: достижение предельной глубины износа хотя бы на одной точке поверхности контакта, достижение предельного износа на некоторой доли поверхности, появление царапины определенной дли-

ны, предельной поверхностной микроповрежденности, достижение предельного линейного износа всей поверхности или заданное сближение двух контактирующих деталей.

Оценивается поврежденность групп участков, связанных некоторыми условиями совместности изнашивания, и таких характеристик усталостной поврежденности, как вероятность зарождения коротких и макротрещин. Оценивается взаимовлияние различных процессов повреждения. Например — взаимного влияния изнашивания и усталостного повреждения. Причем не только как конкурирующих процессов, но их взаимоускоряющее влияние.

Реализованы основные алгоритмы общей методики расчета и показана их работоспособность. Уточнение и совершенствование методик и программ продолжается.

Результаты экспериментальных исследований. Для определения характеристик изнашивания АФМ используются известные и некоторые оригинальные методики экспериментов. Для определения усталостных свойств АФМ используется комплекс методик экспериментов: испытываются монометаллические образцы для определения основных свойств, испытываются слои АФМ, нанесенные на более прочную основу для получения характеристик зарождения и развития системы трещин, испытываются подшипники-образцы при контактировании с валом при наличии масла. Систематизация экспериментальных методик и полученных результатов приведена в монографии [2].

Заключение. Выполнены исследования ПС некоторых машин и даны рекомендации по повышению их долговечности.

1. Бабин А.П., Зернин М.В. Конечноеэлементное моделирование контактного взаимодействия с использованием положений механики контактной псевдосреды // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2009, № 4, 84—107
2. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. — 3-е изд. — М.: ЛИБРОКОМ. — 2017
3. Зернин М.В., Мишин А.В., Рыбкин Н.Н., Шилько С.В., Рябченко Т.В. Учет многозонного гидродинамического трения, перекоса осей и контактной податливости вала и втулки подшипников скольжения // Трение и износ. — 2017 (38), № 3, 269—279
4. Зернин М.В. Дискретное моделирование повреждений подшипников скольжения с учетом комплекса воздействий и критериев отказа. Сообщение 1. Общая схема расчета долговечности // Трение и износ. — 1996 (17), № 6, 747—755
5. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. — М.: Машиностроение. — 1984

ADHESIVE CONTACT PROBLEMS FOR A THIN ELASTIC LAYER: ASYMPTOTIC ANALYSIS AND EVALUATION OF PROPERTIES

N.V. Perepelkin¹, F.M. Borodich²

¹School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA, UK, PerepelkinM@cardiff.ac.uk

²School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA, UK, BorodichFM@cardiff.ac.uk

Introduction. Thin coatings and layers can be found virtually everywhere: from paint on a car to a protective film in a can of food, from bio-compatible tribo-coating on a medical implant to thin conductive films in the display of a smartphone or a solar cell, etc. To ensure proper mechanical and tribological performance, modelling of the contact between the layer and external objects may be needed. In this work we consider an asymptotic solution of the contact problem for thin elastic layer and a rigid punch, and its transition from non-adhesive to adhesive case in the framework of the Johnson-Kendall-Roberts (JKR) theory. Further, we demonstrate how the latter solution can be used to solve the inverse problem: to identify unknown elastic and adhesive properties of the layer using depth sensing indentation (DSI) and the extended Borodich-Galanov (eBG) method.

Asymptotic analysis. A contact problem between a rigid punch and a thin elastic layer bonded to a rigid base is considered. We use an effective yet straightforward asymptotic approach [1] that emerged in works by A. Goldenveizer, and further developed by J. Kaplunov and E. Nolde. Introducing the small parameter of the problem as the ratio of the layer thickness to the characteristic size of the contact area, we derive a two-term asymptotic solution for displacement and stress fields, as well as the dependency between the punch displacement δ and the indentation force P .

The transition from non-adhesive to the adhesive case. Considering axisymmetric formulation, we implement the JKR theory [2] of adhesive contact to reduce the non-adhesive solution of the contact problem to the adhesive one. The JKR theory is a simple and elegant combination of the Derjaguin concept of energy balance and the Johnson virtual “loading — unloading” process.

Because particular expressions for the components of the system’s total energy may have complex form, we demonstrate that the transformations of the JKR approach can be done in general form, without specification of a particular force-displacement relation for the punch. As the result, the following formulae allow explicit transition from a non-adhesive force-displacement relation to the JKR adhesive one for the punch displacement δ and the indentation force P :

$$P = P_H(a) - 2S(a)\sqrt{\frac{\pi wa}{S'(a)}}, \quad \delta = \delta_H(a) - 2\sqrt{\frac{\pi wa}{S'(a)}}, \quad (1)$$

where a is the radius of the contact area, P_H and δ_H are the force and punch displacement in the non-adhesive case, w is the work of adhesion, $S(a)$ is the slope of the non-adhesive force-displacement curve:

$$S(a) = \frac{dP_H(a)/da}{d\delta_H(a)/da} \quad (2)$$

The identification of properties of coatings. The model-based approach can be used to identify physical properties of coatings and layers, such as elastic moduli or the work of adhesion. In this work we discuss simultaneous identification of the reduced contact modulus of the layer E^* and the work of adhesion w from experimental data of DSI using spherical indenters.

Both the BG and eBG methods implement the model-based approach in which the theoretical (expected) force-displacement curve is adjusted to the experimental DSI data using optimal fitting. The methods allow us to identify simultaneously both elastic and adhesive properties of the sample, e.g. a coating. Here for practical implementations, the eBG method has been used. The eBG was first introduced in [3] and further developed in [4]. The eBG method allows one to use force-displacement relations in which the indentation force P and the indenter displacement δ are parametric functions of the dimensionless contact radius $\bar{a}$:

$$\delta/\delta_c = f_1(\bar{a}, \delta_c, P_c), \quad P/P_c = f_2(\bar{a}, \delta_c, P_c). \quad (3)$$

Here P_c and δ_c are the scaling parameters of the problem. They are subject to adjustment during fitting the experimental data points. The unknown material properties can be found as they are connected to P_c and δ_c via known formulae, which depend on the theory of adhesive contact used to construct (3). It is important to note that the relations (3) are used to describe adhesive contact behaviour of coated medium in both analytical, e.g. [5], and numerical-analytical, e.g. [6], approaches. The extended BG method can be implemented in either case.

1. Borodich, F.M., Galanov, B.A., Perepelkin, N.V., Prikazchikov, D.A., 2018. Adhesive contact problems for a thin elastic layer: Asymptotic analysis and the JKR theory // *Mathematics and Mechanics of Solids*. <https://doi.org/10.1177/1081286518797378>.
2. Johnson, K.L., Kendall, K., Roberts, A.D. Surface energy and the contact of elastic solids // *Proc. R. Soc. London A.* — 1971 (324), 301—313
3. Perepelkin N.V., Kovalev A.E., Gorb S.N., Borodich F.M. Estimation of the elastic modulus and the work of adhesion of soft materials using the extended Borodich-Galanov (BG) method and depth sensing indentation // *Mechanics of Materials*, 2019 (129), 198—213.
4. Perepelkin N.V., Argatov I.I., Borodich F.M. Evaluation of elastic and adhesive properties of solids by depth-sensing indentation. (Submitted)
5. Argatov I.I., Borodich F.M., Popov V.L. JKR adhesive contact for a transversely isotropic layer of finite thickness // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016 (49), 045307.
6. Sridhar I., Zheng Z.W., Johnson K.L. A detailed analysis of adhesion mechanics between a compliant elastic coating and a spherical probe//*J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2004 (37), 2886—95.

СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ АКТИВНОСТЬ СТАЛИ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ТРЕНИИ

В.В. Шевеля¹, Г.С. Калда^{1,2}, Ю.С. Соколан¹

¹Хмельницкий национальный университет, г. Хмельницкий, Украина, valeriy.shevelya@gmail.com

²Жешувский политехнический университет, г. Жешув, Польша, kaldagal@prz.edu.pl

Склерометрические исследования (скрэтч-анализ) с одновременным использованием датчиков акустической эмиссии позволяют оценить прочностные, вязкоупругие и релаксационные свойства металлических поверхностей. При умеренных нагрузках на сканирующий индентор изменения трибологических и реологических показателей фрикционного контакта моделируют локальные процессы контактного взаимодействия и микроструктурной перестройки в поверхностных слоях, свойственные трению скольжения, абразивному изнашиванию и финишной обработке.

Реверсивность трения является одним из важных факторов, влияющих на работоспособность трибосистем. В связи с этим сохраняет актуальность задача установления различий в микромеханизмах контактного взаимодействия при однонаправленном и реверсивном трении с учетом эффекта Баушингера, трибологический аспект которого и возможности практического применения изучены недостаточно.

Исследовались две марки углеродистой стали после термической обработки: сталь 20 и сталь 45. В качестве упрочняющей термической обработки стали 20 образцы подвергались зональному поверхностному оплавлению плазмой электрической дуги и последующему охлаждению с ускоренной кристаллизацией, при которой формировалась ферритно-бейнитная структура. Сталь 45 исследовалась после закалки в воду от температуры 850 °С с последующим отпуском при различных температурах от 100 до 600 °С.

Склерометрические свойства и акустико-эмиссионная активность поверхностных слоев изучались на скрэтч-трибометре RST (Revetest Scratch Tester) фирмы CSM Instruments (Швейцария). Скрэтч-тестирование проводилось при двух многоцикловых режимах ($N = 10$): повторно-однонаправленном и реверсивном. Регистрировались склерометрические сила и коэффициент трения, уровень акустической эмиссии, текущая и остаточная глубины внедрения индентора Роквелла, по которым оценивался реологический показатель упругого последствия. Структурные изменения стали 45, вызванные термообработкой, исследовались методом амплитуднозависимого внутреннего трения на низкочастотной ($f \sim 60$ Гц) установке типа прямого кру-

тильного маятника.

Установлено, что термическое упрочнение стали 20 методом плазменного оплавления обеспечивает трехкратное повышение контактной прочности в условиях повторно-однонаправленного склерометрирования и более чем двухкратное — при реверсивном трении. Зоны упрочнения характеризует значительно более высокая акустическая эмиссия и более выраженное упругое последствие по сравнению с исходным состоянием. Это свидетельствует о высокой релаксационной способности упрочненных зон, причем мощность акустических сигналов от этих зон растет более интенсивно с увеличением числа циклов трения.

В условиях реверсивного трения эффект Баушингера трибологически проявляется в периодическом росте силы трения и глубины внедрения индентора в обратных (четных) циклах по сравнению с прямыми циклами. В противофазе с изменением силы трения упрочненной стали 20 изменялась акустико-эмиссионная активность зоны фрикционного контакта. Упрочненные зоны показали более выраженный эффект Баушингера, и его проявление возрастает с повышением контактной нагрузки.

В случае стали 45 изменение акустической эмиссии в противофазе с изменением силы трения было характерно только для стали в состоянии закалки, а также после низкого отпуска (200 °С). Структуры среднего (400 °С) и высокого (600 °С) отпуска показали синхронное изменение этих трибологических показателей, что свидетельствует о зависимости релаксационных механизмов микроструктурной перестройки при реверсивном трении от температуры отпуска стали.

Сталь со структурой мартенсита и отпущенного мартенсита показала значительно более высокую акустико-эмиссионную активность при трении по сравнению со структурами среднего и высокого отпуска, что является следствием более эффективного развития релаксационных и, связанных с ними, диссипативных процессов. Установлена связь между трибологическим эффектом Баушингера и изменением гистерезисного внутреннего трения стали в зависимости от температуры отпуска, что свидетельствует об идентичности реологической природы этих явлений.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЦИЛИНДРАМИ

В.Д. Тютюма

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

Введение. Для прогнозирования динамических характеристик подшипников скольжения необходима информация о распределении и особенностях формирования давления в зазоре между вращающимися цилиндрами в широком диапазоне их угловых скоростей. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в этом случае развитие термогидродинамических процессов не укладываются в рамки традиционных подходов описания на основе уравнения Навье-Стокса [1, 2]. Поэтому изучение движения и теплообмена в зазоре между вращающимися цилиндрами помимо практического интереса приобретает и особый теоретический смысл, важный для понимания специфики формирования термогидродинамических процессов в условиях больших напряжений сдвига. В работе приведены результаты исследований распределения избыточного давления в зазоре между вращающимся внутренним и неподвижным внешним цилиндрами в зависимости от ширины щели и угловой скорости вращения внутреннего цилиндра.

Результаты исследований. Измеренные значения избыточного давления в щелевом зазоре коаксиально расположенных цилиндров в зависимости от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра ω при различных значениях ширины щели h показаны на рис. 1. Здесь точками нанесены экспериментальные данные. Сплошными линиями обозначены результаты расчетов по теории изэнтропического переноса импульса. Пунктирная линия — расчет по теории Навье-Стокса.

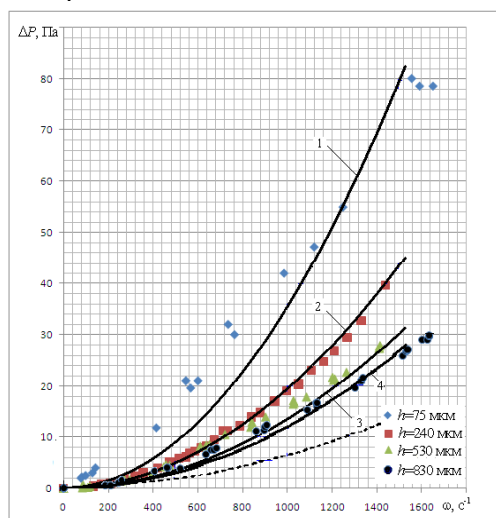


Рис. 1. Зависимость избыточного давления от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра

Экспериментальные зависимости избыточного давления в зазоре между эксцентрично расположенными цилиндрами от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра представлены на рис. 2.

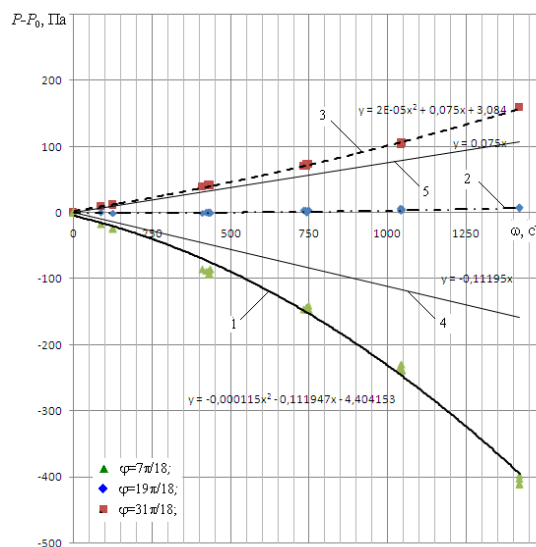


Рис. 2. Экспериментальные значения избыточного давления в щелевом зазоре от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра при эксцентричном расположении цилиндров: 1 — $\varphi=7\pi/18$; 2 — $\varphi=19\pi/18$; 3 — $\varphi=31\pi/18$; 4 — касательная к графику повышенного давления; 5 — касательная к графику пониженного давления.

Как видно, графики давления по абсолютной величине увеличиваются с ростом ω по квадратичному закону, с чем явно не согласуются результаты, полученные на основе решения уравнения Навье-Стокса, предсказывающие линейную зависимость давления от угловой скорости вращения [3].

Заключение. В результате проведенных исследований показано, что изменение давления в зоне сжатия и в зоне разрежения связано не только с «клиновидным эффектом», но дополнительно вызвано нагревом и охлаждением воздуха за счет адиабатического изменения объема, неравномерным подводом тепла диссипации и теплопередачей от воздушной среды в зазоре к стенкам цилиндров.

1. Тютюма В.Д. Экспериментальное подтверждение модели локально-неравновесного течения вязкой жидкости // Докл. НАН Беларуси. — 2014 (58), № 6, 107—111
2. Тютюма В.Д. Некоторые особенности формирования давления в зазоре подшипника скольжения // Трение и износ. — 2018 (39), № 6, 582—588
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука. — 1970

ВЛИЯНИЕ МАРКИ И РАЗМЕРА ГРАФИТСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕДИ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

А.Ф. Ильющенко, А.Н. Роговой, А.В. Лешок, Н.А. Алексеенко

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь, nil-12@inbox.ru

В литературе достаточно подробно описано влияние марки и размера графита на триботехнические свойства и ресурсные характеристики антифрикционных материалов [1—3]. В большинстве случаев графит способствует снижению коэффициента трения, а также способствует повышению противозадирных свойств.

Особенностью работы фрикционных материалов является кратковременность процесса взаимодействия сопрягаемых поверхностей, при этом сопровождающееся выделением большого количества тепла, которое способно привести к пластическому течению материала в процессе последующего взаимодействия.

Оценка действия марки и размера графитосодержащей добавки на триботехнические свойства фрикционного материала на основе меди, работающего в условиях граничного трения, является весьма важной прикладной задачей.

Цель. Оценка влияния марки и размера графитосодержащей добавки на коэффициент трения и износ фрикционного материала на основе меди, работающего в условиях граничного трения.

Материалы и методы.

В качестве объекта исследования использовалась 10% оловянистая бронза пористостью 15—20%, содержащая графитосодержащую добавку (графит карандашный, элементный, электроугольный, кокс литейный, шунгит). Образцы были получены при прессовании 2 т/см^2 , и спекании в шахтной печи в течение 2 часов при температуре 820°C . Сравнительная оценка коэффициента трения и износа материалов осуществлялась на инерционном стенде типа ИМ-58, при скорости скольжения 10 м/с, давлении 4 МПа, работе буксования 16 кДж, расходе смазки 1 л/мин.

Результаты и их обсуждение.

В процессе проведенных исследований было установлено, что максимальное значение коэффициента трения фрикционного материала на основе меди при работе в условиях граничного трения, получено при использовании 30 об.% частиц порошка шунгита, кокса литейного и графита электроугольного размером 63–160 мкм. Использование традиционных порошков графита карандашного ГК-1 и графита элементного ГЭ того же объемного содержания, показало пониженное (до 15%) значение коэф-

фициента трения (рис. 1).

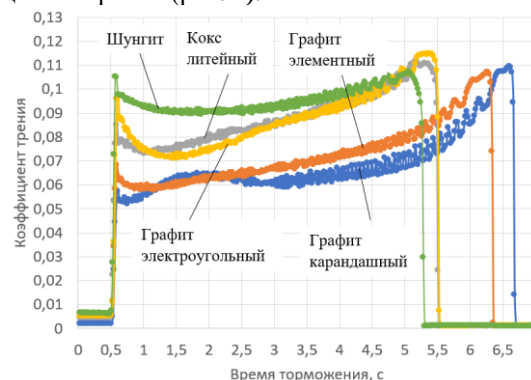


Рис. 1. Влияние графитосодержащей добавки в составе фрикционного материала на коэффициент трения

Минимальное значение износа показал материал, содержащий в своем составе кокс литейный и графит элементный (8 мкм/км после 1000 циклов испытаний), тогда как при использовании графита электроугольного и карандашного — 9 мкм/км. Максимальное значение износа показало использование в составе фрикционного материала порошка шунгита — 10 мкм/км.

Выводы.

Использование в составе фрикционного материала на основе меди, работающего в условиях граничного трения, 30 об.% порошков шунгита, кокса литейного и графита электроугольного размером 63—160 мкм позволило повысить коэффициент трения до 0,07—0,085;

Наименьшее значение износа материала получено при использовании порошка кокса литейного и графита элементного фракцией 60—160 мкм.

1. Болсуновская, Т.А. Влияние марки графита в качестве твердой смазки на триботехнические свойства металлического композиционного материала, [Текст] / И.Ю. Ефимочкин, Н.В. Севостьянов, Н.П. Бурковская // Труды ВИАМ. — 2018, № 7, 69—77
2. Сафонова, М.Н. Влияние упрочняющей фазы на структуру и свойства оловянистой бронзы [Текст] / П.П. Тарасов, А.С. Сыромятникова, А.А. Федотов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012 (14), №1(2), 582—584
3. Калашников, И.Е. Композиционные материалы, упрочнённые модифицированными шунгитовыми породами и керамическими микрочастицами [Текст] / В.В. Ковалевский, Т.А. Чернышова, Л.К. Болотова // Учёные записки ЗабГУ. — 2013, 43—52

О СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ И ТЕХНИКЕ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ТРАНСМИССИЯМИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН С ФРИКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ УПРАВЛЕНИЯ

Л.Г. Красневский

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь.krasnevski_l@tut.by

Актуальность. Последнее десятилетие в мировом автомобилестроении отмечено стремительным ростом применения автоматических трансмиссий (АТ). Долгое время это были классические гидромеханические АТ, состоящие из гидротрансформатора, планетарного механизма, фрикционных элементов управления — мощных многодисковых фрикционов (МФ) и мехатронной системы управления (МСУ). В последние годы появились и новые виды АТ — автоматизированные механические (АМТ), с двумя сцеплениями (ДСТ), бесступенчатые (БСТ), гибридные электромеханические (ГЭМТ). За период с 2000 по 2015 г. применение АТ в Европе возросло с 15% до 50%, в США с 85% до 93%, в Японии с 77% до 90% [1]. Приведенные цифры свидетельствуют о гигантских объемах производства АТ, в том числе и МФ в их составе. АТ содержат несколько МФ (чаще всего 5—6), а общий вес комплекта МФ в тяжелых АТ близок к половине их веса, достигающего 1,5—2 тонн. Все новые АТ (кроме АМТ) содержат заимствованные у них МФ отработанных конструкций.

МФ как элементы управления играют ключевую роль в динамических процессах управления АТ и в целом интегрированными силовыми установками (ИСУ) с автоматизированными приводами: они осуществляют синхронизацию скоростей инерционных масс силовой установки и машины в процессах переключений ступеней под нагрузкой.

К настоящему времени сложились единые методы расчета, проектирования и построения технических средств управления практически для всех типов АТ, несмотря на кардинальные различия их массогабаритных и других параметров. За рубежом опубликовано значительное число научных работ, посвященных решению проблем управления АТ массового производства. Вместе с тем, автору неизвестны зарубежные, а тем более русскоязычные труды, обобщающие этот коллективный опыт. Информация, рассредоточенная по многочисленным источникам (значительная часть — по патентам компаний-производителей АТ), затруднительна для изучения и практического применения при создании отечественных АТ с современными МСУ.

Предложения. Изучение большого объема публикаций, патентов и опыта производства АТ веду-

щих компаний позволило представить технологии создания бортовых аппаратно-программных и алгоритмических средств МСУ АТ и ИСУ в виде следующих **шести технологий**[2]:

- технология «GearShiftStrategy/Map» (выбор законов автоматических переключений АТ);

- технология «Clutch-to-ClutchShifts» (СТС — согласованное управление буксованием включаемых и выключаемых МФ при переключении ступеней);

- технология управления ИСУ (интегрированное управление ДВС и АТ);

- технология «Fly-by-Wire» («управление по проводам» — без механической связи между органами управления оператора и АТ);

- технология формирования алгоритмов управления верхнего уровня для АТ и ИСУ;

- технология отработки конструкции АТ (как объекта управления) и МСУ до уровня ИСУ.

Среди них центральное место занимает СТС, относящаяся непосредственно к функционированию МФ. Рассматриваются ее основные положения, многие из которых практически не освещены в русскоязычных публикациях.

Таким образом, здесь представлен разработанный впервые **мультидисциплинарный комплекс**, состоящий из шести взаимосвязанных базовых технологий. Он содержит большие объемы структурированной информации, которые в совокупности могут рассматриваться как **основы теории и техники управления**, необходимые для создания АТ мобильных машин с фрикционными элементами управления.

Ряд статей, раскрывающих содержание названных базовых технологий, нами опубликован. Эта работа будет продолжена.

1. Impact of Transmission Technologies on Fuel Efficiency — Final Report // U.S. Department of Transportation / National Highway Traffic Safety Administration. — DOT HS 811 667. — August 2012. — Mode of access: <http://www.osti.gov/bridge>.
2. Поддубко, С.Н. Управление динамикой переходных процессов автомобильных силовых установок с автоматизированными приводами: современная теория и техника / С.Н. Поддубко, Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения.: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — 2017, № 6, 66—75

ДИНАМИКА И СТАТИКА ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА ПЛОСКОСТИ
С АНИЗОТРОПНЫМ ТРЕНИЕМН.Н. Дмитриев¹, Е.М. Петроковец²¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия dn7@rambler.ru²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Анизотропное трение — явление, которое известно достаточно давно. При этом публикации, посвященные моделированию движения тел при таком трении, обоснованию характеристик траекторий появились относительно недавно [1, 4]. Отметим, что к явлению анизотропного трения относится асимметричное трение, которое реализуется при контактном взаимодействии наноструктурированных материалов [2]. Создание механизмов, движущихся за счет асимметрии трения обсуждается в работе [3].

Цель работы: выявить особенности финального движения твердых тел в зависимости от формы контакта с плоскостью и закона распределения давления по площадке контакта и при учете анизотропии трения; сформулировать условия начала движения твердых тел в зависимости от условий, возникающих в области контакта тела с плоскостью.

Методы исследования заключаются в составлении системы дифференциальных уравнений движения твердого тела и ее анализа с помощью аналитических и численных методов математики при последовательном учете особенностей, накладываемых анизотропией трения. Для задач о начале движения применяется метод возможных перемещений.

Результаты и их обсуждение. При проектировании динамики устройств следует учитывать возможное движение составных частей с учетом налагаемых связей, под которыми может подразумеваться контакт тел с учетом анизотропного трения. Достаточно часто контакт тел происходит по площадкам в форме круга, прямоугольника, эллипса.

Авторам удалось показать, что в случае узкой прямоугольной пластины (стержня) финальные параметры движения $\beta = \frac{v}{\omega}$ и угол ϑ зависят от ориентации стержня на плоскости в момент непосредственно перед остановкой. Здесь v — величина скорости центра масс, ω — угловая скорость пластины, ϑ — угол, характеризующий направление вектора скорости на плоскости, по которой пластина скользит. При некоторых параметрах анизотропии трения и ориентации пластины возможно несколько вариантов финальных значений β и ϑ , реализация которых зависит от начальных условий движения.

Для тел, опирающихся на круговую или кольцевую площадку и при центрально симметричном распределении давления финальные величины β и ϑ определяются однозначно. Подчеркнем, что финальные значения β и ϑ зависят от момента инерции тела, компонентов матрицы трения, вида распределения давления.

Если тело находится в покое, то под действием силы, приложенной к центру масс параллельно плоскости, и момента, вектор которого перпендикулярен плоскости скольжения, может начаться движение. В начальный момент скорость центра масс и угловая скорость равны нулю. В момент начала движения появляется ускорение центра масс $\mathbf{w} = w(\cos\vartheta \mathbf{i} + \sin\vartheta \mathbf{j})$ и угловое ускорение ε . В данном случае силы трения определяются законом трения по начальным ускорениям.

Уравнения начала движения имеют вид

$$\begin{aligned} mw_0 &= T_\tau + P \cos(\delta - \vartheta) \\ 0 &= T_n + P \sin(\delta - \vartheta) \\ J\varepsilon &= M_\tau + M_C \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь P — активная сила, δ — угол, определяющий ее направление вдоль плоскости скольжения, M_C — проекция активного момента на ось, перпендикулярную плоскости, T_τ и T_n — проекции силы трения на тангенциальную и нормальную оси соответственно, M_τ — момент трения, ϑ — угол, задающий направление начального ускорения центра масс, J — момент инерции.

Силы трения в правых частях уравнений (1) можно представить как функции величин ϑ и $\beta = \frac{w}{\varepsilon}$. Обозначив правые части уравнений (1) через $F_1(\beta, \vartheta)$, $F_2(\beta, \vartheta)$, $F_3(\beta, \vartheta)$ соответственно и разделив первое уравнение на третье, получаем систему из двух уравнений для нахождения β и ϑ

$$F_2(\beta, \vartheta) = 0, \quad \beta = \frac{JF_1(\beta, \vartheta)}{F_3(\beta, \vartheta)} \quad (2)$$

Утверждение. Твердое тело начинает совершать плоскопараллельное движение тогда и только тогда, когда система (2) имеет решение и после подстановки найденных значений ϑ и β в систему (1) окажется, что $w > 0$ или $w = 0$, $\varepsilon > 0$.

1. Zmitrowicz A. Mathematical descriptions of anisotropic friction // Int. J. Solids Structures. — 1989 (25), no. 8, 837—862
2. Shil'ko S.V., Chernous D., Ryabchenko T.V., Hat'ko V.V. Estimation of the Friction Coefficient of a Nanostructured Composite Coating // Mechanics of Composite Materials. — 2017 (53), no. 5, 579—588
3. Wael Saab, Peter Racioppo, Anil Kumar and Pinhas Ben-Tzvi. Design of a miniature modular inchworm robot with an anisotropic friction skin // Robotica. — 2019, (37), 521—538
4. O. Silantyeva, N. Dmitriev. A study of sliding motion of a solid body on a surface with asymmetric friction // ZAMM Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. — 2018, 98(7), 1210—1223

ДИССИПАТИВНЫЙ МАЯТНИКОВЫЙ АДГЕЗИОМЕТР НА ОДНОМ ШАРИКЕ

И.З. Джилавдари¹, С. Мекид², Н.Н. Ризноокая¹¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; RiznookayaN@yandex.ru²Университет нефти и полезных ископаемых имени короля Фахда, Дахран, Саудовская Аравия

Метод наблюдения за свободными качаниями физического маятника с опорой в виде шарика или цилиндра давно используется для различного рода физических исследований. В первую очередь, он использовался для измерения твердости материалов и покрытий. Известны такие устройства как маятник Герберта с одним шариком и маятники Персоза и Кенига с двумя шариками. Аналогичный по своему принципу действия прибор использовался для измерения трения качения. В этих исследованиях смещение шариков в процессе качаний маятника существенно больше радиуса пятна контакта.

С развитием приборостроения появились задачи исследования механизмов сопротивления качению при очень малых смещениях контактирующих тел друг относительно друга. Возник новый термин, характерный для таких перемещений — «pre-rolling». Здесь при малых нагрузках основным механизмом диссипации энергии маятника является адгезия тел, находящихся в контакте. Поэтому исследование закономерностей диссипации энергии в этом режиме позволяет установить закономерности адгезионного взаимодействия тел в условиях начала качения и в области реверса.

Ранее авторами данной работы был предложен двух шариковый маятниковый прибор для исследования параметров трения качения твердых тел в режиме «pre-rolling». Огибающие кривых затухания амплитуд и изменения периода аппроксимировались аналитическими зависимостями, что позволило определить численное значение параметров аппроксимации, которые связывались с диссипативными и упругими составляющими сил адгезионных связей, коэффициентом трения качения и коэффициентом сопротивления качению.

Однако, маятниковый прибор с опорой на два шарика имеет существенный недостаток: его можно применять только при наличии двух одинаковых образцов или при наличии одного образца с однородной поверхностью. Этот недостаток исключается при использовании маятника с одним шариком.

В связи с этим, авторами была предпринята попытка построения такого прибора (рис. 1). Однако, здесь, в отличие от двух шарикового маятника, приходится контролировать качания вокруг двух горизонтальных осей U и V . Основная проблема, которая здесь возникает, состоит в обеспечении условий, при которых маятник совершает периодические качания с относительно большим периодом T_V в одной вертикальной плоскости. Второй проблемой, потребовавшей своего решения, встала проблема подавления периодических поперечных качаний с относительно малым периодом T_U , которые сопровождают качания с периодом T_V .

Здесь важно добиться независимости друг от друга этих качаний с тем, чтобы минимизировать перекачку энергии между ними. Опыт показал, что степень зависимости этих качаний, в первую очередь, обусловлена статической балансировкой маятника.

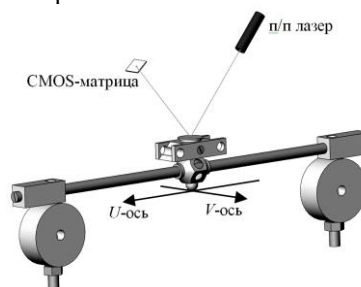
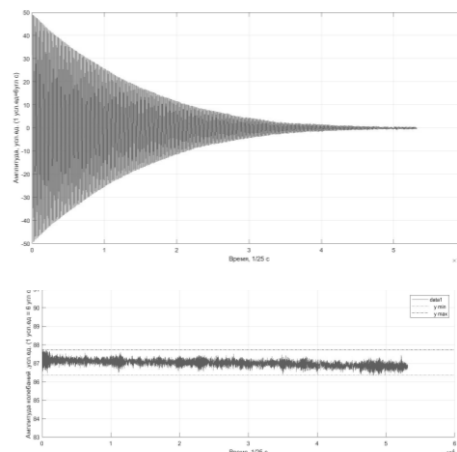
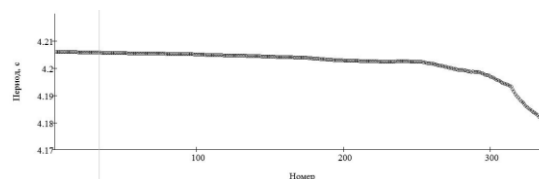


Рис. 1. Маятник с опорой на один шарик

Если качания независимы, то при качаниях вокруг оси V световое пятно, отраженное от зеркала, перемещается в CMOS-матрице строго по прямой линии. Запись качаний вокруг этой оси имеет вид затухающей осциллограммы, и запись качаний вокруг оси U — вид незатухающего шумового сигнала (рис. 2). На рис. 3 показана зависимость периода колебаний вокруг оси V от номера качания. Все кривые построены для качаний стального шарика по стали.

Рис. 2. Амплитуда качаний маятника вокруг оси V (верхний рисунок) и оси U (нижний рисунок)Рис. 3. Зависимость периода качаний маятника вокруг оси V от номера качания

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Гетикова¹, А.Н. Попов¹, И.С. Шилько²¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; mgetikova@mail.ru²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Низкомодульные антифрикционные полимерные и эластомерные композиты получили массовое применение в уплотнениях подвижных соединений гидросистем. Для повышения долговечности уплотнительных элементов применяют направленное регулирование адгезионной и деформационной составляющих коэффициента трения базовых материалов формированием тонких углеродных покрытий [1] или объемным наполнением углеродными волокнами [2]. Это предполагает рассмотрение процесса фрикционного взаимодействия названных композитов с позиций двойственной природы трения.

Цель работы. Исследование нагрузочных зависимостей коэффициента трения с выделением его адгезионной и гистерезисной составляющих на примере бутадиен-нитрильной резины, модифицированной углеродными покрытиями.

Материалы и методы. Модифицировались образцы бутадиен-нитрильной резины, на которых из графита в плазме импульсного катодно-дугового разряда наносились углеродные покрытия толщиной ~ 0,1 мкм. Триботехнические характеристики в условиях возвратно-поступательного движения определялись на микротрибометре по схеме «сфера — плоскость» при различных нагрузках. Скорость скольжения индентора по длине дорожки трения изменялась по синусоидальному закону с максимальной скоростью 27 мм/с. Для интерпретации данных использовались программные продукты Python (x, y) и Origin 9.0.

Оригинальный алгоритм, созданный в программе Python (x, y), преобразует данные микротрибометра в массив для последующего импорта в программу Origin 9.0, где производился их анализ с графической визуализацией по методике, описанной в работах [3, 4]. Аналогичное исследование проводилось для среднего и максимального мгновенного значений коэффициента трения.

Результаты и их обсуждение. Трибоиспытания показали увеличение среднего значения коэффициента трения при различных нагрузках.

При построении пространственно-временных карт среднего и максимального мгновенного коэффициентов трения установлено снижение гистерезисных потерь с уменьшением скорости скольжения меньше критической. Можно отметить расширение диапазона скоростей скольжения, при которых гистерезисные потери не изменяются с увеличением нагрузки.

В начальный момент величина среднего коэффициента трения значительно меньше максимального мгновенного значения; после приработки их значения практически совпали.

Зависимости максимального мгновенного коэффициента трения от нагрузки в логарифмических координатах в виде прямых линий показаны на рисунке.

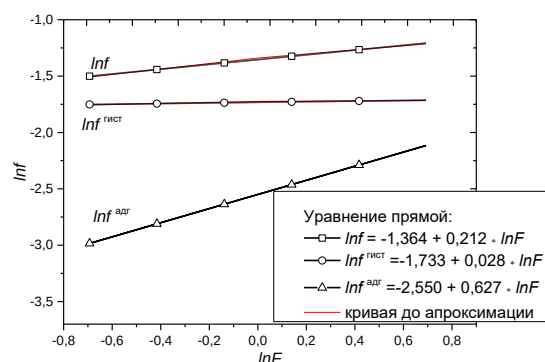


Рисунок. Адгезионная и гистерезисная составляющие максимального мгновенного коэффициента трения углеродного покрытия

Видно, что наклон прямой $\ln F_{\text{адг}}$ увеличился с 0,51 (для среднего коэффициента трения) [4] до 0,63 (для максимального мгновенного значения коэффициента трения). Вклад гистерезисных потерь практически не меняется, а адгезионных — возрастает. Так, при нагрузке 2 Н в начальный момент времени гистерезисная компонента была равна 0,17, а адгезионная — 0,04; после 1000 циклов скольжения — 0,18 и 0,12, соответственно.

Заключение. Применение методики визуализации адгезионной и гистерезисной составляющих коэффициента трения способствует интерпретации результатов трибоиспытаний.

1. Pei Y.T., et al. Flexible diamond-like carbon film coated on rubber // Progress in Organic Coatings. — 2013 (76), no. 12, 1773—1778
2. Маскалюнайте О.Е., Заболотских С.Ю., Некрасова В.В., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Шелестова В.А. Исследование эластомерной композиции с модифицированными углеволокнами // Каучук и резина — 2016, № 2, 48—49
3. Попова М.А., Дворак А.М., Рязанов И.В., Казаченко В.П. Модифицирование поверхности бутадиен-нитрильной резины азот- и фторсодержащими углеродными покрытиями // Полимерные материалы и технологии. — 2017, № 3, 71—76
4. Гетикова М.А. Особенности трения поверхностно модифицированной углеродным покрытием резины // Трение и износ. — 2019 (40), № 2, 238—244

SURFACE TOPOGRAPHY AND PROPERTIES OF OPERATED SLIDE JOURNAL MICRO-BEARING

O. Lupicka¹, I. Maciejewski¹, T.A. Kuznetsova², V.A. Lapitskaya²

¹Koszalin University of Technology, Faculty of Technology and Education, Koszalin, Poland;
oliwia.lupicka@tu.koszalin.pl

²A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

Technological progress in the field of material sciences as well as the dynamic development of nanotechnology are currently observed in Micro/Nano Electro-Mechanical Systems (MEMS/NEMS). These systems play increasingly important role in the following areas: transport technologies, industrial engineering, biomedical engineering, etc. [1].

The hydrodynamic slide bearings are used very often in micro-systems, for example they are used typically in Computer Hard Drives [2,3]. Moreover, micro-bearings are used in micro-turbines, micro-mechanisms, micro-motors and other low dimensional devices [1]. The high-performance micro-bearings of low surface roughness (from several to tens of nanometers) are required due to a small size of such systems.

Most mechanical properties are known to be scale dependent. Therefore, the properties of nanoscale structures need to be measured. MEMS/NEMS materials need to exhibit good mechanical and tribological properties on the micro/nanoscale [1]. There are new measurement methods employed more and more often for the purpose of an efficient evaluation of the surface roughness or friction coefficient. One of the modern measurement techniques utilizes the atomic force microscopy.

The principal objective of this paper is to determine the micro-bearing friction coefficient by using the AFM method.

Materials and research methods

The experimental research is realized by using the slide micro-bearings that are used in the PC cooling system. The micro-bearings are manufactured by GEMBIRD company.

The slide micro-bearings are exposed to operating process with the following parameters: time (t) 48; 168; 336 h and load (F): 0.5; 1.0; 1.5 N. The wear process of micro-slide bearings is realized using dedicated experimental set-up that is developed at the Koszalin University of Technology [4].

During the tests, the surface of bearings before and after operating process is evaluated by means of the atomic force microscope Dimension FastScan (Bruker, USA). The surface topography is measured employing the PeakForce QNM mode with the standard silicon cantilevers NSC-11 (Micromash, Estonia). The tip radius of each silicon cantilever has a value of 10 nm and the console stiffness is established as 7.05 N/m. The AFM scanning area is chosen as 20 x 20 μm^2 and the

resolution of 256 x 256 points. The friction coefficient is determined by AFM using the standard diamond probe on silicone console D300 (SCDprobes, Estonia). The tip radius of 40 nm, console stiffness of 13.84 N/m and the normal force of 1.164 μN are used. Scanning area is settled as 20 x 20 μm^2 and the resolution of 256 x 256 points. The measurement is made in the lateral force mode.

Results and discussion

The hardness $H = 16.8$ GPa and Young's modulus $E = 229$ GPa of the investigated journal slide micro-bearings are determined experimentally by using Nanoindenter 750 Ubi Hysitron (USA) [4].

The obtained friction coefficients of the tested journal slide micro-bearings are included in the range of 0.180 ± 0.029 to 0.359 ± 0.071 . The highest values of the friction coefficients are obtained for the shortest operating time $t = 48$ h. The roughness of tested surfaces is achieved to be equal or higher in comparison with the initial state (Fig.1).

The obtained results confirm that an influence of the selected process parameters, i.e. time t [h] and load L [N], is essentially important for defining the wear in nano-scale.

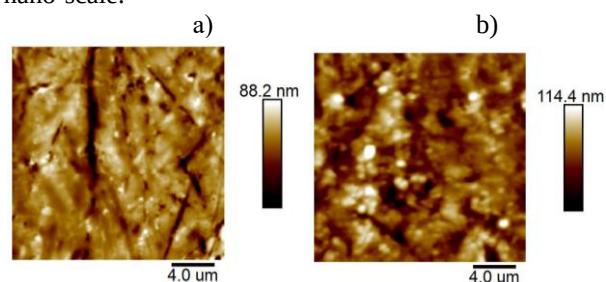


Fig.1. Surface topography of the tested journals of slide micro-bearings. Process parameters: journal bearing in the initial state (a), time $t = 48$ h and load $F = 0.49$ N (b)

1. Nanotribology and nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS materials and devices / B. Bhushan, // Microelectronic Engineering 84 (2007) p. 387—412.
2. Measurement of non used microbearing occurring in computer HDD Seagate Barakuda / K. Wierzcholski, A. Miszczak, A. Khudoley A. // Journal of KONES, 2011, Vol.18 No. 2, p. 477—482.
3. Surface topography of operated slide journal micro-bearings used in HDD / A. Miszczak // Journal of KONES Powertrain and Transport, 2012, Vol. 19, No. 4, p. 449—456.
4. The selected methods of investigating the slide micro-bearing / O. Lupicka, I. Maciejewski, B. Warcholinski, T.A. Kuznetsova, V.A. Lapitskaya // Methodological Aspects of Scanning Probe Microscopy, Belarus, 2018, p. 168—176.

МЕХАНИЗМ САМОУСТАНОВЛЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКЕ

Г.В. Кожевникова

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

Введение. Значения и распределение трения на контакте инструмент-заготовка при поперечной прокатке являются определяющими факторами для подбора оптимальных параметров процесса [1]. 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].

Развитие теории и совершенствование технологии поперечной прокатки предполагают дальнейшую разработку адекватных методов измерений параметров процесса и корректную математическую обработку экспериментальных данных.

Цель работы состоит в установлении зависимости коэффициента трения при пластическом течении от пути скольжения деформируемого металла по инструменту.

Результаты и их обсуждение. Известно [2], что при поперечной прокатке силы трения самоустанавливаются на уровне необходимом для создания момента сил, способствующих прокатке и равных по величине моменту сил, препятствующих прокатке. Отмечено, что этот эффект обеспечивает закономерность увеличения сил трения при увеличении проскальзывания деформируемого металла относительно инструмента:

$$\mu = L + M \frac{v_{ин}}{v_{мет}}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент трения по Амонтону; $v_{ин}$ — линейная скорость инструмента; $v_{мет}$ — линейная скорость деформируемого металла; L, M — константы.

Относительная величина $v_{ин} / v_{мет}$, с одной стороны, объясняет почему не изменяется коэффициент трения при изменении размера заготовки, но с другой стороны, логическое объяснение подобной закономерности затруднено.

Нами предложено преобразование выражения (1), в котором скорости замены отрезками пути, пройденного инструментом и деформируемым металлом:

$$\mu = \frac{B}{i} + A, \quad (2)$$

где i — коэффициент скольжения; A, B — константы.

Указанное преобразование внесло ясность в искомую зависимость: чем больше деформируемый металл относительно инструмента отстает от него, тем выше коэффициент трения.

Экспериментальные и расчетные результаты определения сил трения по Амонтону μ при поперечной прокатке стали 45 при температуре металла 1100 °С приведены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные результаты определения сил трения по Амонтону при поперечной прокатке стали 45

δ	i эксп	μ эксп	μ расч	A	B
1,02	0,95	0,043	0,080	-0,5857	0,6372
1,05	0,85	0,17	0,16		
1,10	0,73	0,29	0,29		
1,15	0,65	0,40	0,39		
1,20	0,60	0,50	0,48		
1,23	0,57	—	0,53		

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные результаты определения сил трения по Прандтлю:

$$\mu_{\tau} = \tau / K = \frac{B'}{i} + A', \quad (3)$$

где τ — касательное напряжение; K — пластическая постоянная материала.

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные результаты определения сил трения по Прандтлю при поперечной прокатке стали 45

δ	μ_{τ} эксп	μ_{τ} расч	A'	B'
1,02	0,317	0,325	-0,6888	0,9629
1,05	0,444	0,444		
1,10	0,651	0,630		
1,15	0,803	0,793		
1,20	0,916	0,916		
1,23	—	1,000		

В итоге, впервые установлена зависимость коэффициентов трения по Амонтону и Прандтлю при пластическом течении от пути скольжения деформируемого металла по инструменту.

- Кожевникова Г.В. Самоустановка сил трения при поперечной прокатке // Трение и износ. — 2016 (37), № 4, 421—426
- Кожевникова, Г. В. Теоретические и технологические основы поперечно-клиновой прокатки заготовок из сталей с ограниченной пластичностью: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07: защищена 19.02.15 / Кожевникова Гражина Валерьевна. — Минск, 2015

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКИ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ

Г.В. Кожевникова

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

Введение. При поперечной прокатке 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 их окислы, 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 также является одним из важнейших критериев устойчивого протекания процесса поперечной прокатки: если оно недостаточно для передачи требуемой энергии от инструмента к заготовке происходит потеря сцепления заготовки с инструментом и ее проскальзывание [2].

Изменение сил контактного трения при поперечной прокатке обеспечивает изменение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, которое в свою очередь определяет свойства прокатанного изделия [3].

Цель работы состоит в оптимизации процесса поперечной прокатки путем изменения контактного трения.

Результаты и их обсуждение. В работе рассмотрены три варианта процесса поперечной прокатки (плоско-деформированное состояние) стали 45 с обжатием $\delta = 1,10$ при температуре 1100°C : I — с приложением к заготовке дополнительных моментов сил, способствующего прокатке (-50% базового); II — с приложением к заготовке дополнительных моментов сил, препятствующего прокатке ($+50\%$ базового); III — без приложения этих моментов (базовый момент).

В теории пластичности коэффициент трения в большей степени, чем коэффициент Амонтона, принято использовать в виде отношения Прандтля $\mu_\tau = \tau / K$ — отношения касательного напряжения на контакте τ к пластической постоянной материала K (или $2K$) [4].

В рассматриваемых вариантах процесса коэффициенты трения по Прандтлю, рассчитанные методом полей линий скольжения, соответственно, были равны 0,315; 0,945 и 0,630 (базовый). Поля линий скольжения в этих трех случаях, естественно, отли-

чались друг от друга. В области контакта гидростатическое давление P / K было равно соответственно $-0,151$; $-2,97$ и $-2,20$ (базовое), в области оси детали — соответственно $2,05$; $-0,46$ и $0,80$ (базовое).

Отметим первый важный результат расчетов: при создании момента сил, препятствующего прокатке, гидростатическое давление из растягивающего превращается в сжимающее, что предотвращает вскрытие осевой полости — известный дефект поперечной прокатки. Создание момента сил, способствующего прокатке, снижает проскальзывание заготовки по инструменту, что увеличивает коэффициент скольжения i и снижает коэффициент трения по Прандтлю μ_τ .

Нами установлено, что увеличение среднего напряжения при пластическом течении (сжимающее напряжение со знаком “—”) сопровождается более интенсивным уменьшением размеров зерна металла d_m и увеличением условной плотности дислокаций $U_{\text{усл}}$. Результаты данной работы подтверждают это положение (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета параметров процессов поперечной прокатки стали 45 (обжатие $\delta = 1,10$, температура 1100°C)

М доп.	-50%	0%	+50%
μ_τ	0,315	0,630	0,945
P_z / K конт	-1,10	-2,20	-3,30
P / K конт	-0,151	-1,42	-2,97
P / K ось	2,05	0,80	-0,46
i_τ	0,96	0,73	0,59
d_m , мкм ось	5,50	7,97	10,47
$U_{\text{усл}}$, град мкм ось	6013	4796	3089

В итоге установлено, что изменением сил контактного трения при поперечной прокатке возможно изменять напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и, тем самым, оптимизировать плотность дислокаций в деформируемом металле, его размеры зерна и ресурс пластичности.

1. Шукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. — Мн.: Наука и техника. — 1986
2. Kozhevnikova G. Cross-wedge rolling. — Minsk: Belorusskaya nauka. — 2012
3. Кожевникова Г.В. Самоустановление сил трения при поперечной прокатке // Трение и износ. — 2016 (37), № 4, 421—426
4. Унков Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л. [и др.] Теория пластических деформаций металлов. — М.: Машиностроение. — 1983

ИМИТАТОР БОРТОВОГО ТРИБОМЕТРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.Г. Кудрицкий, Д.М. Гуцев, А.Я. Григорьев

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

Современный этап развития науки и технологий неразрывно связан с изучением космического пространства и полетами летательных аппаратов на орбиту Земли. Вместе с тем, одной из самых значимых задач при подготовке таких полетов является обеспечение надежности самих летательных аппаратов, и, как следствие, безопасность членов экипажа и сохранность исследовательского оборудования. Вопрос обеспечения надежности летательных аппаратов становится открытым в самом начале пути, когда на стадии проектных работ возникает необходимость подбора материалов и смазок, обеспечения необходимых зазоров между сопрягаемыми материалами в условиях Космоса.

Выбор конкретного материала для трибосопряжения наряду с его физическими и химическими свойствами, как правило, определяется и его триботехническими свойствами. Однако получение полного набора триботехнических характеристик того или иного материала требует проведение испытаний по различным схемам в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров. С целью увеличения объема информации и необходимостью проведения серии имитационных наземных экспериментов с расширенной исследовательской программой нами был создан имитатор бортового трибометра (ИБТ), одной из отличительной особенностью которого, в отличие от бортового трибометра, является использование гравитационной системы нагружения вместо системы на упругих элементах.

Кинематическая схема и трехмерная модель имитатора бортового трибометра приведены ниже на рис. 1.

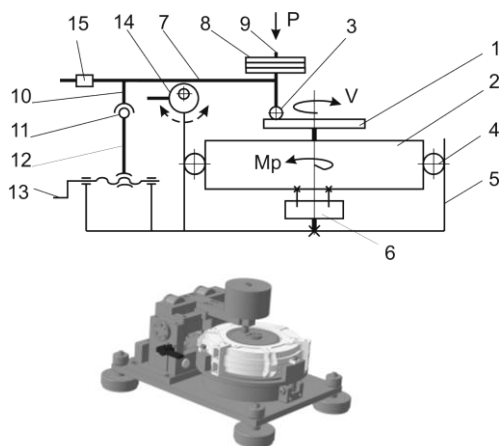


Рис. 1. Кинематическая схема и трехмерная модель имитатора бортового трибометра

Образец-диск 1 приводится во вращение с помощью высокомоментного электродвигателя, ось которого расположена вертикально. Работа устройства измерения момента трения между индентором 3 и образцом 1 основана на определении реактивного вращающего момента МР на статоре двигателя (метод т.н. мотор-весов).

Корпус двигателя 2 закреплен на внутреннем кольце прецизионного четырехточечного шарикоподшипника 4, наружное кольцо которого установлено в корпусе трибометра 5. При работе возникающий МР воспринимается датчиком 6 типа вал-фланец. Фланец датчика соединен с корпусом двигателя 2, а его вал с корпусом трибометра 5.

Устройство нагружения выполнено в виде консольной поворотной балки 7 с закрепленной на ней цапгой с индентором 3 и грузами 8. Грузы в виде дисков с центральным отверстием одеваются на вертикальный штырь 9, закрепленный в балке 7, которая жестко соединена с поперечиной 10. Поперечина 10 опирается на шариковые подшипники 11 и имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси на 90 градусов. Суппорт 12 имеет возможность перемещаться по направляющим с помощью винтового механизма 13, обеспечивая изменение радиусов дорожек трения на величину до 12 мм. Винтовой механизм 12 снабжен устройством выборки «мертвого хода» ходового винта. Для удержания балки 7 в поднятом положении суппорт оснащен стопор. В конструкции устройства нагружения предусмотрен арретир 14, позволяющий поворачивать поперечину 10 вместе с балкой 7 на угол 5—10 градусов, что позволяет плавно поднимать и опускать индентор на образец-диск. Балка оснащена регулируемыми противовесами 15 для уравнивания несбалансированных масс устройства нагружения.

По результатам проведенных испытаний ИБТ было установлено, что схема проведения имитационных наземных испытаний на базе ИБТ позволяет оценивать параметрическую эквивалентность наземных и натуральных испытаний материалов космического назначения.

1. Оборудование, материалы и методики испытаний на трение и износ в Космосе и имитационных условиях / А.Я. Григорьев, Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий, Н.К. Мышкин // Современные проблемы трибологии: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Киев, 19-21 мая 2010 г. / Аэрокосмический ин-т Нац. авиационного ун-та МОН Украины; — Киев, 2010. — С.9-10.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ МАСЕЛ ПО ДИАМЕТРУ ПЯТНА КОНТАКТА

В.В. Подгорная¹, Л.Н. Марченко², Ф.А. Григорьев¹, И.Н. Ковалева¹

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

²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь; lmarchenko@gsu.by

В работе проведена классификация растительных масел, предполагаемых к использованию для смазки металлополимерных пар, по диаметру пятна контакта.

Рассматривались следующие типы масел: Т1 — «Рапс чистый», Т2 — «И-20А», Т3 — «Льняное», Т4 — «Рапс + касторовое 3%», Т5 — «Рапс + касторовое 5%», Т6 — «Рапс + касторовое 10%», Т7 — «Рапс + 1% ДФА + 3% лён», Т8 — «Рапс + 1% ДФА + 5% лён», Т9 — «Рапс + 1% ДФА + 10% лён». По каждому типу масел проводились пять независимых триботехнических испытания по измерению показателя износа при нагрузке 40 кгс, согласно ГОСТу 9490-75, с измерением диаметров пятен износа шариков.

Группировка типов масел проводится по метрике Евклида в качестве меры близости объектов [1, 2]:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{30} (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (1)$$

где d_{ij} — расстояние между i и j типом масел, x_{ik} — диаметры пятен износа.

Классификация масел проводилась в ППП Statistica 8.0 с помощью процедуры Cluster Analysis. Матрица расстояний (1) между объектами представлена в табл. 1.

Таблица 1. Матрица расстояний классификации

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
T1	0,00	5,48	0,45	0,15	0,16	0,14	1,13	0,59	0,45
T2	5,48	0,00	5,04	5,43	5,41	5,55	4,36	4,90	5,05
T3	0,45	5,04	0,00	0,40	0,37	0,51	0,69	0,16	0,08
T4	0,15	5,43	0,40	0,00	0,11	0,18	1,07	0,54	0,39
T5	0,16	5,41	0,37	0,11	0,00	0,18	1,05	0,51	0,37
T6	0,14	5,55	0,51	0,18	0,18	0,00	1,19	0,65	0,51
T7	1,13	4,36	0,69	1,07	1,05	1,19	0,00	0,55	0,70
T8	0,59	4,90	0,16	0,54	0,51	0,65	0,55	0,00	0,18
T9	0,45	5,05	0,08	0,39	0,37	0,51	0,70	0,18	0,00

Масло типа Т2 наиболее отличается от всех остальных типов по диаметру пятен износа. Среди оставшихся масло типа Т7 более несхоже с другими маслами и так далее.

Расстояние между кластерами оценивалось с использованием одиночной связи (ближнего соседа), когда степень сходства оценивается по расстоянию между ближайшими объектами кластеров [2].

На рис. 1 представлена дендрограмма классификации.

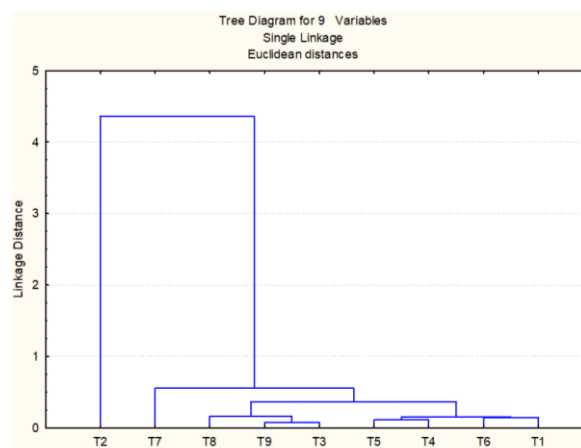


Рис. 1. Дендрограмма классификации типов масел по диаметрам пятен износа

Дендрограмма показывает, что в данном случае на первом шаге были объединены в один кластер объекты Т3 и Т9, расстояние между ними 0,08, как наиболее близкие. На втором шаге к ним присоединился объект Т8 и так далее. В итоге все рассматриваемые масла по диаметрам пятен износа можно разбить на 4 группы. Первую схожую группу образуют масла Т3, Т9 и Т8. Вторая представлена двумя подгруппами: Т4, Т5 и Т1, Т6. Масло Т7 отличается по диаметрам пятен износа, от перечисленных выше, и образует третью группу. Четвертая группа, образованная маслом Т2, наиболее удалена от остальных кластеров.

Из представленных данных можно сделать вывод, что проведенная классификация подтверждает исследования триботехнических свойств данных образцов, рассмотренных в [3].

1. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. — John Wiley&Sons. — 2008
2. Маркевич О.В., Марченко Л.Н., Парукевич И.В., Подгорная В.В., Федосенко Е.А. Профессионально-мотивационные ориентации студентов первого курса // Инновационные образовательные технологии. — 2014, №3 (39), 47–51
3. Григорьев Ф.А. Индустриальный смазочный материал на основе растительного сырья // Сб. матер. V Республиканской науч.-техн. конф. молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования», ИММС НАН Беларуси. — Гомель. — 2018, 82

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

В.В. Подгорная¹, Л.Н. Марченко², Ф.А. Григорьев¹, И.Н. Ковалева¹

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

²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь, lmarchenko@gsu.by

В работе дана статистическая оценка триботехнических испытаний растительных масел с присадками и без. В качестве основы использовались рапсовое масло с добавками дифениламина (ДФА), льняного и касторового масла. Исследованные образцы обозначены следующим образом: Т1 — тип масла «Рапс чистый», Т2 — «И-20А», Т3 — «Льняное», Т4 — «Рапс + касторовое 3%», Т5 — «Рапс + касторовое 5%», Т6 — «Рапс + касторовое 10%», Т7 — «Рапс + 1% ДФА + 3% лён», Т8 — «Рапс + 1% ДФА + 5% лён», Т9 — «Рапс + 1% ДФА + 10% лён».

По каждому типу масел проводились пять независимых триботехнических испытаний по измерению показателя износа при нагрузке 40 кгс, согласно ГОСТу 9490-75, с измерением диаметров пятен износа шариков.

Статистический анализ результатов выполнен с помощью ППП Statistica 8.0. В табл. 1 представлены показатели центров распределения диаметров пятен износа для исследованных образцов. Здесь приведены средние значения диаметров пятен износа и их доверительные интервалы на уровне значимости 5%; медиана, характеризующая срединное значение диаметров пятен износа по типу масла; а также мода, соответствующая наибольшей частоте появления значения среднего диаметра и соответствующая ей частота из 30 измерений.

Таблица 1. Меры положения диаметра пятен износа ($D_{\text{пл}}$) для типов масел

Тип масла	Среднее значение $D_{\text{пл}}$, мм	Доверительный интервал, $p = 95\%$		Медиана	Мода
		Левая граница	Правая граница		
T1	0,651	0,643	0,658	0,650	0,650 (8)
T2	1,652	1,646	1,657	1,650	1,650 (10)
T3	0,731	0,727	0,735	0,730	0,730 (13)
T4	0,661	0,655	0,668	0,660	0,680 (7)
T5	0,665	0,660	0,670	0,660	0,660 (9)
T6	0,639	0,634	0,644	0,640	0,640 (9)
T7	0,856	0,852	0,861	0,860	0,860 (14)
T8	0,757	0,752	0,761	0,760	0,760 (16)
T9	0,730	0,726	0,734	0,730	0,730 (14)

Наименьшая вариация диаметра пятен износа около среднего наблюдалась у типа масла Т3, стандартное отклонение которого равно 0,010. При этом разброс значений диаметров пятен износа также был минимальный (0,011%). Были определены меры формы распределения типов масел: асимметрия и эксцесс. Для масел Т3, Т6 и Т9 имеет место правосторонняя

асимметрия, при котором медиана и мода больше среднего значения соответствующего типа масла. Положительный эксцесс наблюдался у диаметров пятен износа типов масел Т3, Т6 и Т8, что свидетельствует о более остроконечном распределении диаметров пятен износа по сравнению с нормальным.

Наибольший средний износ наблюдался для типа масла Т2, причем для него медиана и мода меньше среднего, наименьший — для типа масла Т1. Среднее значение диаметра пятна износа совпадает с медианой и модой для типа масла Т9 и равно 0,73.

В табл. 2 представлены характеристики разброса диаметров пятен износа для разных типов масел: стандартное отклонение и коэффициент вариации.

Таблица 2. Меры разброса диаметра пятен износа для типов масел

Тип масла	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
T1	0,020	0,040 %
T2	0,014	0,019 %
T3	0,010	0,011 %
T4	0,017	0,030 %
T5	0,013	0,017 %
T6	0,014	0,021 %
T7	0,012	0,014 %
T8	0,012	0,013 %
T9	0,012	0,014 %

Стандартные коэффициенты асимметрии и эксцесса диаметров пятен износа для всех типов масел принадлежат интервалу $(-2; 2)$, поэтому в проведенном эксперименте отсутствуют систематические ошибки [1, 2].

Из представленных данных можно сделать вывод, что наиболее достоверный и устойчивый результат имеет рапсовое масло с добавками ДФА и льняного масла, что согласуется с исследованиями физических свойств данных образцов, рассмотренных в [3].

1. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. — John Wiley & Sons. — 2008
2. Маркевич О.В., Марченко Л.Н., Парукевич И.В., Подгорная В.В., Федосенко Е.А. Профессионально-мотивационные ориентации студентов первого курса // Инновационные образовательные технологии. — 2014, № 3 (39), 47—51
3. Ковалева И.Н., Григорьев Ф.А. Оценка коррозионной активности и окислительной стабильности растительных масел // Сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. «Трибология — Машиностроению 2018», посвященной 80-летию ИМАШ РАН, 19—21 ноября, 2018, г. Москва, Россия. — 2018, 232—233

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИБОКОНТАКТА ЧАСТИЦЫ И ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛАСТОМЕРА ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В.Г. Копченков

Северо-Кавказский Федеральный университет, Ставрополь, Россия; kopchenkov2@rambler.ru

Введение. В таких отраслях промышленности как горнодобывающая, строительная и многих других связанных с перемещением абразивных масс, интенсивное изнашивание узлов и деталей машин связано с ударным воздействием абразивных частиц. В определенных условиях эксплуатации наиболее эффективным оказался метод гуммирования — футерование резиной деталей машин, подвергающихся ударному воздействию твердых частиц. Так гуммированные насосы имеют срок службы в 8...10 раз больше, чем грунтовые насосы из стали 55Л [1]. Выявление влияния сил трения, вязкоупругих свойств материала на формирование траектории и длины пути скольжения при ударе частицы по поверхности, дает возможность подойти к определению закономерностей разрушения и, в последующем, оценить износостойкость материалов, работающих в режиме изнашивания потоком абразивных частиц. Этот подход остается актуальным [2, 3].

Цель. Определение и расчет основных характеристик кинематики движения частицы при внедрении в поверхность вязкоупругого материала.

Теоретическое исследование. Вследствие несовершенной упругости эластомера удар сопровождается диссипацией энергии с изменением основных кинематических параметров частицы — скорости отскока и угла после удара. Схема соударения показана на рис. 1.

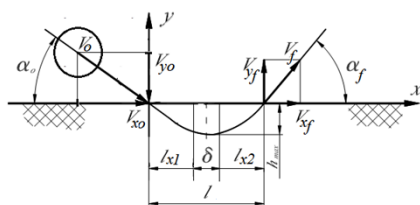


Рис. 1. Схема взаимодействия частицы с поверхностью

Путь перемещения частицы при ударе по поверхности низко модульного материала, в общем случае, складывается из скольжения при внедрении l_{x1} , скольжения при отскоке l_{x2} и упругого смещения частицы совместно с материалом поверхности δ . Длина пути внедряющейся частицы определяется соотношением величины силы трения и сдвиговой прочности материала поверхности, которая коррелирует с эластичностью, которая определяет вязкоупругие свойства материала. Соотношение отдельных составляющих пути трения меняется в зависимости от угла атаки. Величина смещения материала δ на длину пути скольжения частицы не влияет. Но

при угле атаки внутри конуса трения горизонтальное проскальзывание практически исчезает. Поэтому общее перемещение частицы по поверхности определится из сложения всех перемещений

$$l = l_x + \delta = l_{x1} + l_{x2} + \delta. \quad (1)$$

Изменение параметров удара удобно описывать, используя понятие коэффициента восстановления скорости. Обозначим через k_y коэффициент нормальной составляющей скорости. По аналогии изменение тангенциальной составляющей скорости можно обозначить через k_x

$$k_y = V_{yf}/V_{y0}, \quad k_x = V_{xf}/V_{x0}, \quad (2)$$

где V_{y0} , V_{x0} — начальная скорость; V_{yf} , V_{xf} — конечная скорость в проекции на оси x и y

Коэффициент восстановления тангенциальной составляющей скорости k_x зависит от силы трения и его можно определить по соотношению угла внедрения $\text{tg}\alpha_0$ и угла отскока $\text{tg}\alpha_f$. После ряда преобразований получим выражение для пути трения скольжения

$$l_x = \frac{V_{x0} \cdot t_1 \cdot \cos\alpha_0}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{S} \frac{\text{tg}\alpha_0}{\text{tg}\alpha_f} \right) \cdot \frac{1 + \sqrt{S}}{\sqrt{S}} \quad (3)$$

где t_1 — время внедрения частицы в поверхность, S — эластичность эластомера.

Исследования на экспериментальной установке позволили получить значения угла отскока, скорости отскока и влияние эластичности на эти характеристики удара.

Выводы.

1. Установлено, что с увеличением модуля упругости угол отскока снижается. С увеличением эластичности, угол отскока увеличивается.
2. Во всем, практически используемом, интервале изменения модуля упругости и эластичности резины угол отскока от поверхности резины отличается от угла атаки не более чем на $\pm 8^\circ$.
3. Коэффициент трения оказывает влияние на процессы контактно — фрикционного взаимодействия только при углах атаки менее $30\text{—}40^\circ$.

1. Пенкин Н. С. Копченков В. Г. Сербин В. М и др. Гуммированные детали машин. — М.: Машиностроение. — 2013
2. Uzi A., Levy A. Energy absorption by the particle and the surface during impact // Wear. — 2018 (**404—405**), 92—110.
3. Arena G., Friedrich K. Solid particle erosion and viscoelastic properties of thermoplastic polyurethanes // Express Polymer Letters. — 2015 (**9**), no. 3, 166—176

ВКЛАД «АНТИФРИКЦИОННОСТИ» В РАЗРАБОТАННУЮ КОНЦЕПЦИЮ СВЯЗИ ХИМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОСТОЙКИХ ТЕРМОПЛАСТОВ

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

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

Целью работы является создание научной концепции связи химического строения термостойких термопластов различной химической и физической структуры с их трибологическими свойствами.

Объекты исследования. Работа основана на исследовании трения трех групп антифрикционных термостойких термопластов: аморфных, кристаллических, кардовых.

Обсуждение результатов. При разработке общей концепции связи химического строения и трения исходили из связи сухого трения термопластов с тангенциальными сдвиговыми усилиями в поверхностном слое, а следовательно, с энергией межмолекулярного взаимодействия ($E_{\text{ММВ}}$), включающей слабое дисперсионное ($E_{\text{дисп.}}$) и сильное диполь-дипольное ($E_{\text{дип-дип}}$) взаимодействия. В термостойких трибостабильных термопластах связь между химическим строением полимера и трением осуществляется через влияние слабого дисперсионного взаимодействия ($E_{\text{дисп.}}/E_{\text{ММВ}}$) на $F_{\text{мол.}}$. Рост вклада $E_{\text{дисп.}}$ в $E_{\text{ММВ}}$ приводит к понижению $F_{\text{мол.}}$ и, соответственно, к понижению силы трения при $F_{\text{мех}} = \text{const}$.

В каждом конкретном случае трения постоянно сохраняется вклад химического строения испытуемого полимера, выраженный через вычисляемую величину дисперсионной составляющей $E_{\text{ММВ}}$. Именно вклад хим. строения определяет возможность либо невозможность использования полимера в качестве антифрикционного материала, иными словами исходя из уровня его **антифрикционности**. Как правило, вклад слабого дисперсионного взаимодействия в антифрикционных термостойких термопластах составляет более 60% от общей $E_{\text{ММВ}}$ (табл. 1).

Наряду с химическим строением термопластов, на характер развивающихся процессов трения влияют и физические свойства полимерного тела. В случае термопластичных полимеров (ПАЭК) они определяются в первую очередь его молекулярной массой. Повышение молекулярной массы (прив. вязкости) с 0,5 до 2,49 приводит к резкому понижению коэффициента трения в конце эксперимента с 0,5 до 0,35[1].

Кристалличность, равно как и повышение молекулярной массы в аморфных полимерах, улучшает трибологические свойства термопластов, характеризующихся высоким вкладом дисперсионных сил в межмолекулярное взаимодействие (табл. 1). В случае ПФС коэффициент трения (рис. 1) постепенно снижается в процессе создания смазывающейся

поверхности на контртеле [2]. Помимо молекулярной массы и кристалличности при трении кардовых [3] термопластичных полимеров следует учитывать гибкость полимерной цепи.

Таблица 1. Значения вклада энергии дисперсионного взаимодействия в общую энергию межмолекулярного взаимодействия ($E_{\text{дисп.}}/E_{\text{ММВ}}$) и коэффициенты трения термостойких термопластов

Термостойкие термопласты	Линейные аморфные	$\eta_{\text{пр}}$, дл/г*	$E_{\text{ММВ}}$, кДж/моль	$E_{\text{дисп.}}/E_{\text{ММВ}}$, %
	ПАЭК-1	2.49	421	82
	ПАЭК-2	0.5		
	ПСФ	0.5	461	68
	со-ПАЭК-5	0.68	520	83
	со-ПАЭК-7	0.42	575	82
	со-ПАЭК-8	0.62	605	84
	Кристаллические	Кристалличность		
	ПЭК (литьевой)	0.3	258	91
	ПФС (литьевой)	0.3	73	91

Примечание. *приведенная вязкость

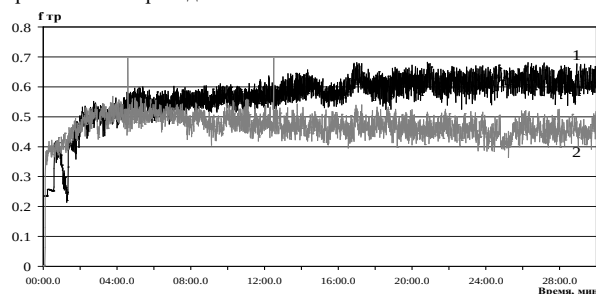


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний: (1) — ПЭК, (2) — ПФС

Таким образом, показано, что связь различных групп линейных аморфных и кристаллических полимеров исходит из решающего вклада химического строения в их трение. Введено представление об антифрикционности этих полимеров, как опосредованного выражения химического строения и потенциальной возможности получения на этой основе антифрикционного материала.

1. Горошков М.В., Шапошникова В.В., Аскадский А.А., Благодатских И.В., Наумкин А.В., Салазкин С.Н., Краснов, А.П. *Трение и износ*, 2018, Т. 39, №2, 149-156.
2. Краснов А.П., Аскадский А.А., Горошков М.В., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Наумкин А.В., Сорокин А.Е., Соловьева В.А. *Доклады Академии наук*, 2018, 6 (479), 1.
3. Краснов А.П., Горошков М.В., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Аскадский А.А., Наумкин А.В., Маслаков К.А., Сорокин А.Е., *Трение и износ*, 2019, 1 (40), 25.

КЛИНОВИДНЫЕ ОПОРЫ СКОЛЬЖЕНИЯ, РАБОТАЮЩИЕ НА ВЯЗКОУПРУГОМ СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАСПЛАВОМ

Е.О. Лагунова

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

Цель работы. Разработка математической уточненной расчетной модели для предпроектных и проектировочных расчетов упорного подшипника скольжения при наличии смазочного материала и расплава легкоплавкого металлического покрытия поверхности направляющей, обладающие вязкоупругими реологическими свойствами.

Постановка задачи. Рассматривается клиновидная опора, состоящая из системы «ползун — направляющая». Предполагается, что поверхности ползуна и направляющей разделены слоем смазочного материала, обладающего вязкоупругими свойствами, при этом направляющая выполнена из материала с низкой температурой плавления. Рассматриваются условия, когда все тепло, выделяющееся в смазочной пленке, идет на плавление поверхностью материала направляющей.

Исходные уравнения и граничные условия

Для решения данной задачи исходим из безразмерных уравнений движения вязкоупругого смазочного материала, уравнения неразрывности и формулы для скорости диссипации механической энергии для определения контура расплавленной поверхности направляющей, покрытой легкоплавким металлическим расплавом.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} + \frac{\beta}{\mu} \frac{d^2 p}{dx^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0,$$

$$-\frac{d\Phi(x)}{dx} = -K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy, \quad K = \frac{2\mu u^*}{h_0 L}.$$

С соответствующими граничными условиями

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

$$u = 0, \quad v = -1 \quad \text{при} \quad y = -\Phi(x);$$

$$p(0) = p(1) = p_a / p^*; \quad p''(0) = 0; \quad \Phi(0) = Kg_0.$$

Асимптотическое решение задачи с учетом граничных условий и реологических свойств вязкоупругого смазочного материала ищем в виде рядов по степеням параметра K , обусловленного расплавом легкоплавкого металлического расплава поверхностью направляющей:

$$v = v_0(x, y) + Kv_1(x, y) + K^2 v_2(x, y) + \dots,$$

$$u = u_0(x, y) + Ku_1(x, y) + K^2 u_2(x, y) + \dots,$$

$$\Phi(x) = -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) - \dots,$$

$$p = p_0 + Kp_1(x) + K^2 p_2(x) + K^3 p_3(x) \dots$$

В результате нахождения точного решения задачи для нулевого приближения, т.е. без учета расплава легкоплавкого покрытия, получаем выражения для безразмерного гидродинамического давления:

$$p_0 = \frac{6(\beta x - \eta \beta x + 2\eta x)}{\beta^3} - \left(\frac{1}{3\eta\beta} C_1 + 4 \right) \left(\frac{x}{\beta} - \frac{3}{2} \frac{\eta x^2}{\beta^2} + \frac{3\eta x}{\beta^3} \right) - \frac{1}{\beta} C_1 \left(e^{\frac{x}{\beta}} - 1 \right) + \frac{p_a}{p^*}.$$

Затем переходя к решению уравнения движения для жидкости, обладающей вязкоупругими свойствами, и применяя соответствующие граничные условия, для случая первого приближения, т.е. уже учитывая расплав легкоплавкого покрытия, определяем выражение для p_1 вида:

$$p_1 = \frac{6M(\beta x - \eta \beta x + 2\eta x)}{\beta^3} - \left(\frac{C_1}{3\eta\beta} + 4M \right) \left(\frac{x}{\beta} - \frac{3}{2} \frac{\eta x^2}{\beta^2} + \frac{3\eta x}{\beta^3} \right) - \frac{1}{\beta} C_1 \left(e^{\frac{x}{\beta}} - 1 \right).$$

Для несущей способности и силы трения получим следующие аналитические выражения:

$$W = p^* \int_0^1 \left[\left(p_0 - \frac{p_a}{p^*} \right) + K p_1 \right] dx = \frac{\mu L^2 u^*}{h_0^2} \left[\frac{6 \left(\frac{\beta}{2} - \eta \frac{\beta}{3} + \eta \right)}{\beta^3} - \left(\frac{C_1}{3\eta\beta} + 4 \right) \left(\frac{1}{2\beta} - \frac{1}{2} \frac{\eta}{\beta^2} + \frac{3\eta}{2\beta} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\beta^2} C_1 e^{\frac{1}{\beta}} + \frac{1}{\beta} C_1 + K \left[\frac{6M \left(\frac{\beta}{2} - \eta \frac{\beta}{3} + \eta \right)}{\beta^3} - \left(\frac{C_1}{3\eta\beta} + 4M \right) \left(\frac{1}{2\beta} - \frac{1}{2} \frac{\eta}{\beta^2} + \frac{3\eta}{2\beta} \right) + \frac{1}{\beta^2} C_1 e^{\frac{1}{\beta}} + \frac{1}{\beta} C_1 \right] \right],$$

$$L_{тр} = \int_0^1 \left[\left. \frac{\partial v_0}{\partial y} \right|_{y=0} + K \left. \frac{\partial v_1}{\partial y} \right|_{y=0} \right] dx = \mu u^* h_0 \left[1 - \frac{\eta}{2} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{6(\beta - \eta\beta + 2\eta)}{\beta^3} - \right. \right.$$

$$\left. - \left(\frac{C_1}{3\eta\beta} + 4 \right) \left(\frac{1}{\beta} - \frac{3}{2} \frac{\eta}{\beta^2} + \frac{3\eta}{\beta^3} \right) - \frac{1}{2\beta^3} C_1 e^{\frac{1}{\beta}} + \frac{\eta}{2\beta^2} C_1 \left(-\frac{1}{\beta} e^{\frac{1}{\beta}} - \frac{1}{\beta^2} e^{\frac{1}{\beta}} \right) \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\beta}{\mu} \left(-\frac{12\eta}{\beta^2} + \frac{3\eta}{\beta^2} \left(\frac{C_1}{3\eta\beta} + 4 \right) - \frac{C_1 e^{\frac{1}{\beta}}}{2\beta^4} - \frac{\eta C_1}{2\beta^3} \left(-\frac{1}{\beta} e^{\frac{1}{\beta}} - \frac{1}{\beta^2} e^{\frac{1}{\beta}} \right) \right) \right] (1 + KM).$$

На основе численного анализа установлены основные закономерности влияния параметров K и числа Дебора. При увеличении значения числа Дебора несущая способность и сила трения резко снижается, а при увеличении значения K несущая способность увеличивается, сила трения уменьшается.

Численный анализ полученных аналитических выражений позволил уточнить трибологические расчетные модели в следующем порядке: несущую способность на 16%, силу трения на 18%.

Благодарности. Работа выполнена по гранту ОАО РЖД № 2210370/22.12.2016 на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С ЛЕГКОПЛАВКИМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, А.Н. Опадких, В.В. Василенко

Ростовский 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 подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, а также пористым покрытием на поверхности вала.

Постановка задачи. Подшипниковая втулка с пористым покрытием шейки вала, имеющее полус в центре вала (рис. 1) уравнение контура вала, вала с пористым покрытием и подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом запишется в виде:

$$r' = r_0 - \tilde{H}; \quad r' = r_0 \quad r' = r_1(1+H) + \lambda' f(\theta), \quad (1)$$

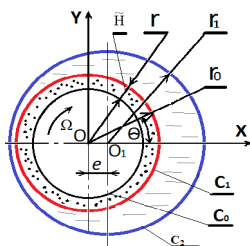


Рис. 1. Расчетная схема

Исходное уравнение — система безразмерных уравнений движения микрополярного смазочного материала, закон Дарси, уравнения неразрывности и формула скорости диссипации энергии для определения функции $\Phi(\theta)$, обусловленной расплавом поверхности подшипниковой втулки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v}{\partial r} &= \frac{dp}{d\theta}, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{v}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{\partial u}{\partial r}, \\ \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0, \\ \frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} &= K \int_{r_0}^{1+\eta \cos \theta + \Phi(\theta)} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 dr, \end{aligned} \quad (2)$$

С соответствующими граничными условиями:
 $u = 0, \quad v = 0, \quad v = 0$, при $r = 1 + \eta \cos \theta + \Phi(\theta)$

$$\begin{aligned} v(0) = 0 \quad u|_{r=0} &= \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad p(0) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \\ v(0) = 1, \quad p = P \quad \text{при} \quad r^* &= \frac{r_0}{\tilde{H}}, \quad \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом малости зазора и $v = 0$ в уравнение (2)

осредним по толщине смазочного слоя второе уравнение, тогда уравнение (2) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{N^2}{2N_1 h} (2r - h) &= \frac{dp}{d\theta}, \quad v = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh), \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} &= 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0, \\ \frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} &= -K \int_{-\Phi(\theta)}^{h(\theta)} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 dr. \end{aligned} \quad (4)$$

Функцию $\Phi(\theta)$ будем искать в виде ряда по малому параметру K :

$$\Phi(\theta) = K\Phi_1(\theta) + K^2\Phi_2(\theta) + K^3\Phi_3(\theta) + \dots = H(\theta), \quad (5)$$

Асимптотическое решение (4) с учетом (3), ищем в виде рядов по степеням малого параметра K :

$$\begin{aligned} v &= v_0(r, \theta) + Kv_1(r, \theta) + K^2v_2(r, \theta) + \dots; \\ u &= u_0(r, \theta) + Ku_1(r, \theta) + K^2u_2(r, \theta) + \dots; \\ \Phi(\theta) &= -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \dots; \\ p &= p_0 + Kp_1(\theta) + K^2p_2(\theta) + K^3p_3(\theta) \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Выполняя точное автомодельное решение задачи при нулевом приближении для гидродинамического давления в смазочном и пористом слое, получим:

$$p_0 = \frac{6r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \sin \theta + \frac{p_g}{p^*} \quad (7)$$

Для первого приближения точное автомодельное решение ищем аналогично как для нулевого приближения (с учетом расплава), в результате имеем:

$$p_1 = \frac{6M\tilde{r}_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \sin \theta \quad (8)$$

Результаты исследования

Показан значительный вклад конструктивного параметров K , обусловленного расплавом, N_1 — характеризующего размер молекул микрополярного смазочного материала, N^2 — параметра связи. С увеличением конструктивного параметра K (при $K = 0$ и $K \neq 0$) коэффициент трения уменьшается на 21%, а несущая способность увеличивается на 12%.

Зависимость коэффициента трения от конструктивного параметра K , обусловленного расплавом, близкая линейной в пределах 0,0009—0,0035.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ГРАВИТАЦИОННЫХ РОЛИКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПАЛЛЕТ

А.Л. Носко, Е.В. Сафронов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; gen-s@mail.ru

Введение. Основным элементом гравитационных роликовых конвейеров, определяющих их безопасную эксплуатацию, являются тормозные ролики, представляющие собой тормозные устройства-ограничители скорости. При этом наиболее часто применяемой конструкцией является центробежный фрикционный ролик (ЦФР) [1]. Конструкция основных частей ЦФР (планетарного мультипликатора, центробежного тормоза), а также методика инженерного расчета тормозного ролика описана в работе [2]. Однако в указанной работе не учтено одновременное торможение обечайки ЦФР, КПД ролика, а также сопротивление передвижения паллеты по ГРК.

Целью работы является уточнение инженерной методики расчета ЦФР, используемого в гравитационных роликовых конвейерах для паллет.

Математическая модель. Расчет ЦФР базируется на математической модели движения паллеты по ЦФР, которая может быть описана основным уравнением динамики поступательного движения:

$$M \frac{dv}{dt} = G \sin \alpha - \sum W - F_T = G (\tan \alpha - w) - F_T, \quad (1)$$

где $G = Mg$ — сила тяжести, действующая на паллету массой M ; $\sum W$ — сумма сил сопротивления передвижению паллеты на ГРК; F_T — тормозная сила ЦФР; $w = \sum W / G \cos \alpha$ — приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК; α — угол наклона роликового полотна ГРК. С учетом малости угла α , можно принять $\sin \alpha \approx \tan \alpha$, $\cos \alpha \approx 1$.

В свою очередь, вращение ЦФР может быть описано основным уравнением динамики вращательного движения относительно оси его вращения:

(2)

где $J_{\text{ЦФР}}$ — момент инерции ЦФР; ω_r — угловая скорость ЦФР; $M_{\text{дв}}$ — движущий момент, действующий на обечайку ЦФР; M_{T1} , M_{T2} — тормозные моменты, действующие на обечайку и ступицу центробежного тормоза ЦФР, приведенный к его обечайке, соответственно.

Следует отметить, что скольжение паллеты по ЦФР имеет место в двух случаях: при неправильном выборе угла наклона α роликового полотна ГРК и в процессе наезда паллеты на невращающийся ЦФР при его разгоне. Оценочные расчеты показали, что процесс разгона ЦФР не превышает 5% времени движения паллеты по ЦФР, которое составляет 6...7 сек, поэтому принимаем отсутствие проскальзыва-

ния.

Считая движение паллеты по ЦФР равномерным, уравнение (2) может быть представлена в виде равенства движущего момента $M_{\text{дв}}$, создаваемого паллетой, и тормозных моментов M_{T1} и M_{T2} :

(3)

или с учетом (1)

(4)

где i_k — количество тормозных колодок; N — сила нормального давления фрикционной накладки на обечайку ЦФР; f — коэффициент трения между фрикционной накладкой и обечайкой ЦФР; $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр обечайки ЦФР; u — передаточное отношение мультипликатора; $\eta_{\text{ЦФР}}$ — КПД ЦФР.

Общая расчетная схема ЦФР подробно описана в работе [2].

Скорость движения паллет. Проводя вычисления, аналогичные описанным в работе [2], получим расчетную зависимость скорости V движения паллеты по ЦФР:

(5)

где r — радиус действия центробежной силы $P_{\text{цб}}$; m_r — масса одной тормозной колодки; $D_{\text{ЦФР}}$ — диаметр ЦФР; a , b , c , k_1 , k_2 — плечи действия соответственно сил нормального давления N фрикционной накладки на обечайку ЦФР, трения N_f , центробежной силы $P_{\text{цб}}$ и сил K размыкающих пружин.

Таким образом, при расчете тормозных устройств ГРК необходимо учитывать не только направление вращения ступицы центробежного тормоза, но и одновременное торможение как обечайки ЦФР, так и ступицы тормоза. Полученная расчетная зависимость позволяет определить режимы работы фрикционной пары ЦФР [3].

1. Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа: Монография — М: Университетская книга. — 2018, 72 с.
2. Сафронов Е.В., Носко А.Л. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // Механизация строительства. — 2017 (78), № 6, 26—31
3. Nosko A.L., Safronov E.V., Soloviev V.A. Study of friction and wear characteristics of the friction pair of centrifugal brake rollers // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), № 2, 145—151

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ЛЕНТЫ

Н.В. Сырейщикова, Д.Ю. Пименов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; snv.ktn@mail.ru, danil_u@rambler.ru

В технологии абразивной обработки шлифовальные гибким абразивным применяется на всех стадиях технологического процесса изготовления деталей: при черновой обработке со снятием значительных припусков (до 20 мм); при чистовой и отделочной обработке заготовок с обеспечением малой шероховатости (до 0,04—0,02 мкм); высокой степени точности (до 0,01—0,10 мм в зависимости от схемы шлифования) и качества финишной обработки (остаточные напряжения в поверхностном слое — до $60 \cdot 10^5$ Па на глубине порядка 0,01—0,02 мм) [1, 2].

Преимуществами ленточного шлифования являются постоянство скорости резания, гибкость и упругость бесконечной ленты, возможность обработки большой поверхности заготовки.

Целью работы является исследование износостойкости рабочего слоя шлифовальной ленты от различных условий шлифования для повышения работоспособности шлифовальной ленты при эксплуатации.

Материалы и методы

Для исследовательских работ применялись шлифовальные ленты размером 620×25 м.

В качестве инструмента использовалась выпускаемая шлифовальная шкурка на тканевой основе по ГОСТ 5009–82, ГОСТ 13344–79, ГОСТ 27181–86.

Повторность испытаний трехкратная. Исследовались марки сталей и сплавов АК5М2, 45, Л96, АЛ4, 30ХГСН2, 1Х14Н9Т, Х13Н10Т, Х18Н10Т, ХН77ТЮР. Составляющая силы резания P_y измерялась традиционным методом с помощью тензодатчиков. Для питания и усиления сигнала использовался УИП-1, с регистрацией шлейфовым осциллографом модели Н-102.

Результаты и их обсуждение.

Исследования износостойкости рабочего слоя шлифовальной ленты осуществлялось по схеме, приведенной на рис. 1. Получены эмпирические зависимости износа (Δ , τ), интенсивности износа ($q \Delta$, г/мин.), аппроксимированные показательной функцией для шлифовальной ленты 15А25С от давления Руд, МПа и усилия режима P_y , Н, при скорости резания 25 м/с, с продольной подачей 0,5 м/с. Данные зависимости получены при шлифовании различных материалов: стали 45, 30ХГСН2, 1Х14Н9Т, Х13Н10Т и сплавов марок: ХН77ТЮР, латуни Л96, сплава АЛ4.

Образцы износа шлифовальных шкурок российского и иностранного производств, показаны на рис. 2.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволили установить по характеру износа

шлифовальной ленты в зависимости от давления три экспериментальные зоны: затупления абразивного слоя; нормального износа, критического износа (разрушения рабочего слоя, прорезания основы и разрывов). Получено экспериментальное обоснование для выбора режимов шлифования по показателям износа. Установлены зависимости данных показателей от различных условий шлифования. Показана объективность установленных зависимостей и их хорошего согласования между собой (коэффициент корреляции $\rho = 0,87 \pm 0,09$). По результатам работы стала возможной разработка методики испытаний для составления рекомендаций по применению шлифовальных лент при обработке различных материалов, насущно необходимых предприятиям-производителям и потребителям абразивного инструмента.

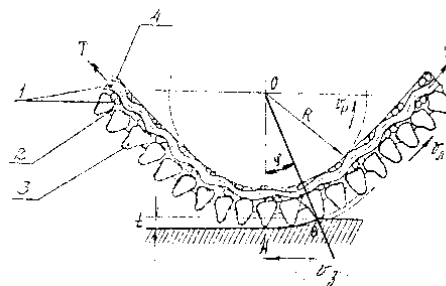


Рис. 1. Схема ленточного шлифования: 1 — тканевая основа, 2 — связка, 3 — зерно, 4 — аппрет; φ — угол контакта, $\angle AB$ — длина дуги контакта, V_l — скорость ленты, V_z — скорость заготовки, R — радиус ролика

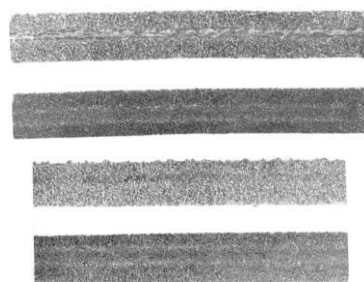


Рис. 2. Образцы износа шлифовальных шкурок российского и иностранного производства при шлифовании в режимах до затупления и до разрушения рабочего слоя

1. Zhao T., Shi Y., Lin X., Duan J., Sun P., Zhang J. Surface roughness prediction and parameters optimization in grinding and polishing process for IBR of aero-engine // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 74. no. 5—8. pp. 653–663. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6020-3>
2. Syreyshchikova N.V., Guzeev V.I. Planning the properties of a coated abrasive by quality function deployment // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. 01026. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201822401026>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ТРЕНИЯ

С.И. Платов¹, Д.В. Терентьев¹, В.В. Рубаник², М.А. Леванцевич³

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия;
knterentyev@mail.ru

²Институт технической акустики, Витебск, Беларусь

³Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Подшипники качения относятся к неконформным узлам трения (узлы с сосредоточенным контактом), в которых между формами взаимодействующих поверхностей нет никакой геометрической связи.

При проектировании неконформных узлов трения необходимо учитывать условия их эксплуатации и трения [1,2]. Наилучшие условия трения в узле достигаются при жидкостном трении или смешанном трении с максимально возможной долей жидкостного трения.

Эластогидродинамическая плёнка (ЭГД-плёнка) является источником жидкостного трения для узлов трения. Проектирование узлов трения, связанных с режимом ЭГД-смазки, таких как подшипниковые узлы, требуют определения толщины смазочного слоя h_o в контакте при их эксплуатации. В работах [3,4] установлено, что на формирование смазочной пленки существенное влияние оказывает маслосъемность трущихся шероховатых поверхностей. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что полученная авторами зависимость позволяет рассчитать толщину смазочного слоя в узле трения при контактировании поверхностей с относительным их смещением с учетом маслосъемности шероховатых слоев. Результаты исследований [3,4] позволяют прогнозировать режим трения, возникающий в тяжело нагруженных подшипниковых узлах металлургических агрегатов, и на этапе проектирования систем и режимов смазывания данных механизмов выбирать требуемые параметры смазочного материала и условия его подачи с учетом состояния шероховатых слоев трущихся поверхностей.

Увеличению толщины смазочной пленки способствуют скорость относительного смещения контактирующих поверхностей и маслосъемность их шероховатых слоев. Повышение скорости от 0,5 до 2,0 м/с, т.е. в 4 раза, влечет увеличение толщины смазочной пленки в среднем в 2,8 раза. Изменение относительной маслосъемности от 0,4 до 0,6 увеличивает толщину смазочной пленки примерно в 1,6 раза.

Таким образом, наибольшее влияние на изменение толщины смазочной пленки в узлах трения оказывает параметр относительной маслосъемности шероховатых контактирующих поверхностей.

Согласно ГОСТ 18855–94 (ИСО 281–89) скорректированный расчетный ресурс для особых свойств подшипников и особых эксплуатационных

условий, рассчитывают по формуле:

$$L_{\text{на}} = a_1 a_2 a_3 L_{10}$$

где L_{10} — базовый расчетный ресурс; a_1 — коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от надежности; a_2 — коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от специальных свойств подшипника; a_3 — коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от условий работы подшипника.

Значение коэффициента a_1 устанавливается и регламентируется ГОСТ, коэффициент a_2 определяется изготовителем подшипников и, в основном, не превышает 1,0. Коэффициент a_3 , согласно ГОСТ может быть больше единицы при благоприятных условиях смазывания.

Известно, что условия смазывания и режим трения между контактирующими поверхностями определяется параметром λ , который зависит от толщины смазочного слоя. С учетом полученных знаний по определению толщины смазочного слоя с учетом маслосъемности предлагается определять коэффициент a_3 следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{при } 3 \leq \lambda \leq 7 \quad a_3 &= 1; \\ \text{при } 3 < \lambda \quad a_3 &= 0,8; \\ \text{при } \lambda > 7 \quad a_3 &= 1,1. \end{aligned}$$

Данный подход к определению ресурса справедлив и для зубчатых передач, работающих в металлургических агрегатах.

1. Повышение надежности и долговечности деталей и узлов металлургического оборудования / С.И. Платов, Л.Е. Кандауров, О.С. Железков, Д.В. Терентьев, Е.И. Мироненков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2009, № 2, 50–55
2. Исследование и разработка режимов смазывания подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, Д.В. Терентьев, Ю.В. Жиркин, Е.И. Мироненков, И.Ю. Мезин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2012, № 2, 98–100
3. Terentyev, D.V. Effect of operating modes and contact surface oil absorption on lubricant film thickness in heavy-duty friction units of metallurgical plants / D.V. Terentyev, N.N. Ogarkov, S.I. Platonov, A.V. Kozlov // Chernye metallurgiya. — 2018, no. 9, 60–64
4. Terentyev, D. Experimental method of calculation to estimate the thickness of lubricating film in the friction unit depending on oil absorption of contacting surfaces / D. Terentyev, N. Ogarkov, S. Platonov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. Manufacturing Technologies, Tools and Equipment. — 2018. — №224. — Article Number 01106. — P. 1–6

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ТРИБОХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЛЬНОГО ОДНОРЯДНОГО ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

П.Д. Чхетиани

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Москва, Россия; Pavelnew1@yandex.ru

Для решения задач механики сплошных сред (контактных, эластогидродинамики, микрогидродинамики, реологии и др.), определения качества радиальных подшипников скольжения и качения, а также трибохарактеристик смазочных материалов и дизельных и реактивных топлив, в ИМАШ РАН разработаны машина трения (МТ) и методика измерения сил (коэффициентов) трения [1]. В качестве моделей (исследовательских ячеек) использовались высококачественные радиальные подшипники скольжения и качения.

Современные технологии изготовления подшипников качения обеспечивают телам качения наиболее высокие, почти идеальные характеристики геометрии и микрогеометрии, на втором месте — внутренние кольца, на третьем — наружные. Поэтому для того чтобы существенно повысить качество подшипника необходимо в первую очередь повысить качество его колец, а также качество сборки с тем, чтобы в подшипнике не оказались почти идеальные, но разноразмерные тела качения. Наконец, необходимы оборудование и методики, обеспечивающие определение качества подшипников в сборе.

МТ и соответствующие методики позволяют ранжировать радиальные подшипники качения на основании анализа экспериментальных зависимостей коэффициентов трения (f) от частот вращения (n) внутреннего кольца и величины n , при которой в испытуемом подшипнике сформировалась эластогидродинамическая сплошная смазочная пленка (ССП). Предполагается, что при прочих одинаковых условиях в некотором (одном и том же для партии испытуемых подшипников) диапазоне n низкое качество изготовления подшипника должно приводить к повышенным f и n , при которой возникает эластогидродинамическая СПП.

Экспериментальная зависимость $f(n)$ радиальных подшипников качения на участке эластогидродинамической СПП аналогична кривой Штрибека для подшипников жидкостного трения при гидродинамической СПП, однако, по мере уменьшения n самописец, регистрирующий f начинает все более рельефно реагировать на качение каждого из тел качения через наиболее нагруженную радиальной силой зону подшипника. Регистрируемая при этом неидеальная синусоида (рис.1) замечательна тем, что в отличие от идеальной, которая должна была быть получена в случае испытаний идеального подшипника, ее параметры повторяются каждый раз, когда в зоне действия максимальной нагрузки оказываются одни и те же участки дорожек качения внутреннего и наружного колец и конкретное тело качения

(конкретное, а не любое, поскольку испытывались радиальные однорядные шарикоподшипники (РОШ) нормального класса точности). Следует добавить, что благодаря ножевым опорам, обеспечивающим самоустановку наружного кольца подшипника шары, при вращении внутреннего кольца и проворачивании под воздействием сил трения наружного, перемещаются по одним и тем же траекториям, обеспечивающим минимальное сопротивление качению и это имеет решающее значение для корректности экспериментов. Если точнее, то при качении шара через наиболее нагруженную зону подшипника, он испытывает силовое воздействие одних и тех же герцевских площадок внутреннего и наружного колец.

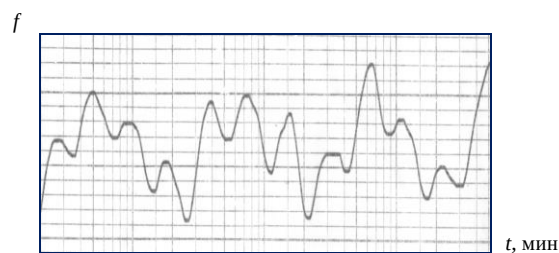


Рис. 1. Изменение коэффициента трения во времени при качении шаров через наиболее нагруженную зону РОШ

Объекты испытаний — три РОШ, один отечественный — «тип 0000 — основной» (ГОСТ 8338–75) и два импортных, известные под условным обозначением «...206». Размеры подшипников: $d = 30$ мм; $D = 62$ мм; $B = 16$ мм — количество тел качения (шаров) 9 шт.

Условия экспериментального исследования
Нагрузка, Н 146
Диапазоны частот вращения (n) внутреннего кольца РОШ, об/мин 0,09-18
Температура, °C 25-0,5
Диапазоны частот (n) возбуждающих максимальные горизонтальные перемещения станины МТ, об/мин ...10-15
Среда.....авиационное масло МС-20

Опыт рис. 1 был проведен при $n = 0,272$ об/мин, при которой частота вращения сепаратора с комплектом шаров составляла $n_c = 0,108$ об/мин. Отсюда один полный оборот сепаратор совершал за $\sim 9,3$ мин, следовательно очередной шар оказывался в наиболее нагруженной зоне РОШ через приблизительно одну минуту после предыдущего.

1. Чхетиани П.Д., Щербakov Ю.И. Фундаментальные трибозакономерности при смазке радиальных однорядных подшипников качения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2017 (83), № 8, 56—63

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 3

Технологии и применение полимерных и композиционных материалов

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2019)

25—28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь

СОЗДАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ
ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯА.А. Охлопкова^{1,2*}, С.А. Слепцова¹, Н.Н. Лазарева¹,
Т.А. Охлопкова¹, Л.А. Никифоров¹, Р.В. Борисова¹¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия; *okhlopkova@yandex.ru²Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

С интенсивным внедрением полимерных нанокomпозитов во все отрасли промышленности приоритетной областью материаловедения является создание multifunctional материалов, адаптированных к заданным условиям эксплуатации. Особую значимость эти материалы приобретают при реализации государственной программы РФ "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года", которая предусматривает мероприятия по модернизации и развитию инфраструктуры арктической транспортной системы.

Целью работы является создание полимерных нанокomпозитов (ПНК) триботехнического назначения на основе термопластов.

Материалы и методы исследования. Полимерными матрицами являются политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки ПН 90 (производитель — АО «Гало-Полимер», Россия) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки GUR 4022 (производитель — «Celanese», Германия). В качестве наполнителей использовали природные слоистые силикаты: каолинит, бентонит и вермикулит, а также наноразмерные неорганические оксиды (Al_2O_3 , ZrO_2 , CuO , MgO , SiO_2).

При создании нанокomпозитов использовали следующие технологии:

1. Технология, основанная на стандартной методике переработки ПТФЭ — ГОСТ 10007–80, включающая предварительную механоактивацию слоистых силикатов в планетарной мельнице «Активатор 2S» (Россия) с последующим смешением с ПТФЭ [1].

2. Совместная механоактивация слоистого силиката и ПАВ перед смешением с полимерной матрицей — СВМПЭ [1, 2].

3. Технология совмещения наночастиц неорганических оксидов и СВМПЭ под воздействием ультразвука в жидкой среде с последующей подпрессовкой ($P = 4$ МПа) и прессованием ($P = 10$ МПа) при $175^\circ C$ в течение 20 мин.

Проведены исследования деформационно-прочностных (ГОСТ 11262-80), триботехнических характеристик по схеме трения «палец—диск».

Структуру разработанных нанокomпозитов исследовали методами ИК-спектроскопии, рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, дифференциально-сканирующей калориметрии.

Результаты и их обсуждение. Установлена

оптимальная продолжительность механоактивации слоистых силикатов, равная 2 мин, при соотношении мелющих тел 1:40. Износостойкость разработанных композитов на основе ПТФЭ, наполненного 7 мас.% бентонита увеличивается в 1040 раз при сохранении деформационно-прочностных свойств на уровне исходного ПТФЭ.

Технология совместной механоактивации каолинита и цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) показала снижение скорости линейного и массового изнашивания ПНК в 2,5 и 5 раза, соответственно, снижение коэффициента изнашивания при сухом трении, и повышение сопротивления абразивному износу по сравнению с аналогичным полимерным композитом без ПАВ.

Исследованы деформационно-прочностные свойства композитов с наночастицами неорганических оксидов в количестве от 0,1—2 мас.% под действием УЗ (рис. 1). Зарегистрировано увеличение относительного удлинения при разрыве (ϵ_{pp}) на 10—15% в случае наполнения SiO_2 и ZrO_2 . Из рис. 1 видно, что введение наполнителей приводит к увеличению предела прочности при растяжении (σ_{pm}) в случае наполнения до 0,5—1,0 мас.%, при дальнейшем увеличении содержания наполнителей происходит снижение данного показателя.

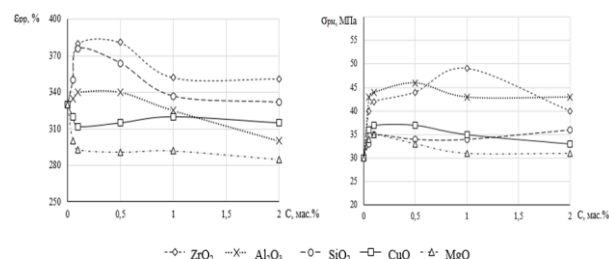


Рис. 1. Зависимость ϵ_{pp} и σ_{pm} ПКМ от содержания нанонаполнителей (C, мас.%)

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке МНИВО РФ НИР №FSRG-2017-0021, FSRG-2017-0017.

1. Kirillina Iu.V., Nikiforov L.A., Okhlopkova A.A., Sleptsova S.A. Nanocomposites Based on Polytetrafluoroethylene and Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene: A Brief Review // Bulletin of Korean Chemical Society. — 2014 (35), 12, 3411—3420
2. Nikiforov, L.A., Okhlopkova T.A., Kapitonova Iu.V. Surfactant Effects on Structure and Mechanical Properties of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene/Layered Silicate Composites // Molecules. — 2017 (22), 2149—2158

**ПЛАСТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ
С РАЗЛИЧНЫМИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В.Г. Колбая, В.В. Коврига

ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», Москва, Россия; kovriga@polyplastic.ru

Цель

Изучение пластического разрушения ПЭ труб с различными сроками эксплуатации для выделения параметра, который может быть использован для диагностики работоспособности газопровода.

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 их обсуждение

Определены значения ЕКВ при двухосном и одноосном нагружениях. Результаты представлены в табл. 1.

Определены значения скачка деформации. Результаты представлены в табл. 2.

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	5,9	6,0
ПЭ100 CRP100	6,7	6,9

Таблица 2. Величины скачков

Марка ПЭ	Величина скачка деформации, %
ПЭ100 Н1000РС	530
ПЭ80 РЕ4РР25В	580
ПЭ100 CRP100	460
ПЭ100 CRP100-RC	660

1. Kolbaya V. G., Kovriga V. V., Plastic failure in polyethylene pipes with different life, Polymer material and technologies. — 2016 (2), № 4, 51—56.
2. Kolbaya V. G., Plastic failure of polyethylene pipes with different life, dissertation — М.: Moscow technological university, dissertation technical science, 2017.
3. С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян «Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология»: Научное издание — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010 — 352С., С29

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СШИВАНИЯ ПЭ НА ВУЛКАМЕТРАХ И РОТАЦИОННОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ

В.В. Коврига

ООО «Группа Полимертепло», Москва, Россия

Исследованы особенности перекисного сшивания полиэтилена, применяемого в трубах горячего водоснабжения. Оценка проводилась на трех видах приборов: ротационном вискозиметре, безроторном вулканметре и роторном вулканметре. Одновременно, проводилась оценка степени набухания сшитой композиции в орто-ксилоле. Полученные данные показали, что при перекисном сшивании полиэтилена технологические параметры процесса сшивания могут быть оценены с использованием стандартных методов, применяемых в резиновой промышленности (табл. рис.1). Предложено по величине крутящего момента рассчитывать напряжение сдвига и равновесный модуль упругости. Наличие равновесия подтверждается стабильно низкими значениями тангенса потерь. Рассчитанные по данным измерения равновесного модуля на вулканметре значения параметра молекулярного веса между узлами сетки МС отличны от аналогичных параметров, определенным по данным набухания, что связано со структурированием набухшего полиэтилена при охлаждении. Таким образом, измерение крутящего момента и степени набухания, позволяют оценить параметры сетки, как в области высоких температур, так и в области комнатных температур. Кроме того, показано существование оптимума вулканизации, при перекисном сшивании полиэтилена. Определены значения энергии активации процесса сшивания и предложены схемы расчетов технологических режимов. Показано, что значение величин МС, полученные на основании расчета по крутящему моменту, близки по величине к значениям МС, полученным на основании прямого измерения равновесного модуля при ступенчатом простом растяжении.

Благодарности. Автор выражает благодарность специалисту фирмы «Аврора» Д.В. Левину, за предоставление схемы пересчета крутящего момента в напряжении сдвига на вулканметрах. А также

д.т.н. Ю.А. Наумовой за анализ процесса формирования оптимума вулканизации.

Тангенс потерь

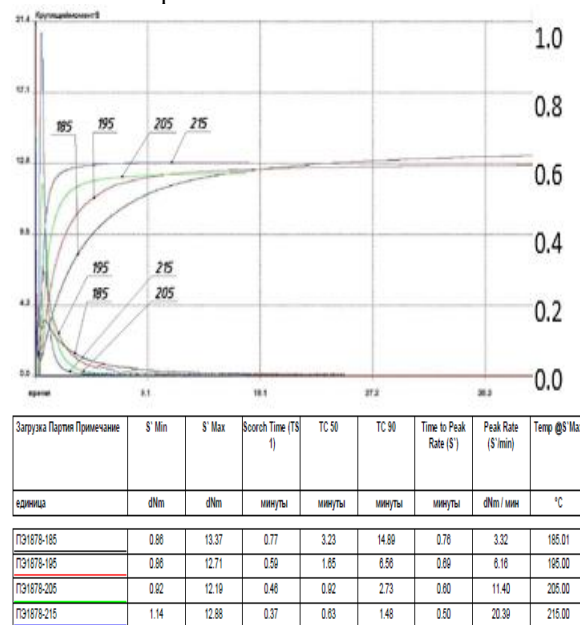


Рис. 1. Зависимость крутящего момента и тангенса механических потерь от времени прогрева при различных температурах, определенных на безроторном вулканметре. Кривые моментов — верхний пучок, кривые потерь — нижний пучок. Цифры у кривых — температуры испытания, в градусах Цельсия

- Пятин И.Н., Арсеньева Л.В., Белкин Р.Ю., Курбатова Ю.В., Резниченко Д.С., Битт В.В., Наумова Ю.А., Орешенкова Т.Ф., Коврига В.В. Исследование кинетики сшивания полиэтилена на роторных и безроторных вулканметрах и ротационном вискозиметре системы плоскость-плоскость // Полимерные материалы и технологии. — 2019 (5), № 1, 53—62
- Пятин И.Н., Журавлёва С.Ю., Васильева А.С., Шершнёв В.А., Коврига В.В. Температурная зависимость равновесного модуля в сшитом полиэтилене. Статический метод // Пластические массы. — 2018, № 11—12, 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ж.Б. Сагдолдина, Б.Т. Туякбаев, А. Маулит, А.Б. Кенесбеков

Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан;
Sagdoldina@mail.ru

Введение. Расширение областей применения полимерных материалов потребовало создания на его основе новых материалов с заданным комплексом свойств, способных к переработке в изделия высокопроизводительными методами. Большой интерес к радиационным методам обусловлен тем, что их применение в промышленности вместо традиционных методов модифицирования материалов (таких как термообработка в печах, гальваническое нанесение покрытий, химические методы модифицирования с использованием растворителей и большой продолжительностью обработки и т.д.) приводит к существенной экономии средств, электроэнергии, повышению эффективности производства, значительному уменьшению экологически вредных последствий производства. Важным обстоятельством является также то, что в ряде случаев электронно-лучевая обработка (ЭЛО) позволяет получить такие структурно-фазовые состояния материалов, которые при традиционных методах обработки не реализуются [1]. Например, при радиационном модифицировании полиэтилена структурирование (сшивку) молекул повышает механическую прочность и термостойкость полиэтилена. Облученные провода и кабели с полиэтиленовой изоляцией могут эксплуатироваться при более высоких температурах (токовых нагрузках) [2].

Цель. Исследование влияния дозы ЭЛО на трибологические характеристики полимера полиэфиримид (PEI).

Материалы и методы. ЭЛО полимера PEI на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-4 в АО «Парк ядерных технологий» (г. Курчатов). ЭЛО была проведена в следующих режимах: энергия пучка 4,5 МэВ, ток пучка 6,84 мА, доза облучения 2 МГр, 3 МГр и 4 МГр, время экспозиции 30 с. Измерение твердости образцов полимера проводили на приборе ТК-2М в соответствии с ГОСТ 4670–91. Трибологические испытания на трение скольжения проводили на трибометре ТНТ-S-BE-0000 с использованием стандартной методики «шар-диск». В качестве контртела использовали шарик диаметром 6,0 мм, из сертифицированного материала — Al_2O_3 . Испытания проводили при нагрузке 15 Н и линейной скорости 10,5 см/с, радиусом кривизны износа 5 мм, путь трения составлял 126 м.

Результаты. Трибологические характеристики образцов до и после ЭЛО характеризовались интенсивностью изнашивания. Интенсивность изнашивания под воздействием наконечника рассчитывается,

исходя из объема вытесненного материала во время проведения испытания, который рассчитывался по следующей формуле:

$$I = \frac{V}{F \times l}$$

где: I — интенсивность изнашивания, $[мм^3/Н \cdot м]$; l — путь трения, $[м]$; F — номинальное давление, $[Н]$; V — объем изношенной части, $[мм^3]$. В результате расчетов были получены данные по интенсивности изнашивания для образцов до и после ЭЛО, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследования износостойкости и твердости полимера PEI до и после ЭЛО

Образец PEI	Твердость, HRB	Объем износа, $мм^3$	Интенсивность изнашивания, $\times 10^{-6}$ $мм^3/Н \cdot м$
До ЭЛО	26,33	626,94	44,4
ЭЛО при 2 МГр	22,67	130,82	9,27
ЭЛО при 3 МГр	25,03	1,88	0,25
ЭЛО при 4 МГр	21,67	2642,71	838,9

Трибологические испытания показали, что после облучения полимера PEI при дозе 3 МГр наблюдается повышение его износостойкости, дальнейшее увеличения дозы облучения приводит к резкому охрупчиванию. После ЭЛО твердость полимера PEI практически не меняется.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность и целесообразность применения электронно-лучевой обработки для повышения ресурса работ изделий из полимера PEI, работающих в условиях трения и изнашивания. На следующем этапе будут изучены механизмы повышения износостойкости полимеров после ЭЛО.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по программе «Грантовое финансирование научных исследований» (код проекта — AP05134982).

1. Raghu S, Archana K, Sharanappa C, Ganesh S, Devendrappa H. The physical and chemical properties of gamma ray irradiated polymer electrolyte films // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2015 (426), 55—62
2. Sarada Idris, Ahmad Ashrif A. Bakar, Chantara Thevy Ratnam, Nur Hasiba Kamaruddin, Sahbudin Shaari, Influence of gamma irradiation on polymerization of pyrrole and glucose oxidase immobilization onto poly (pyrrole)/polyvinyl alcohol matrix // Applied Surface Science. — 2017 (400), 118—128

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ КАНИСТР

Е.С. Петухова¹, П.Н. Петрова¹, Э.В. Чикачев²

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск, Россия; evgspar@rambler.ru

²АО «Саханефтегазсбыт», Якутск, Россия

В связи с территориальными особенностями и сложными дорожно-транспортными условиями Республики Саха (Якутия) (РС(Я)) для обеспечения топливом населения и предприятий труднодоступных не охваченных сетью автозаправочных станций районов АО «Саханефтегазсбыт» была разработана и внедрена система доставки тарированных в пластиковые канистры нефтепродуктов. К таре, предназначенной для перевозки топлив предъявляется ряд требований, одним из которых является наличие постоянных электропроводящих свойств. Кроме того, материал канистр должен обладать устойчивостью к транспортируемой среде и высокими физико-механическими свойствами, в том числе, в климатических условиях РС(Я).

Таким образом, целью данной работы являлись разработка и исследование полиэтиленовых композиционных материалов для канистр с величиной объемного удельного электрического сопротивления не более 10^6 Ом·см.

В качестве объектов исследования использовали как импортное, так и отечественное сырье. Первоначальный состав электропроводящего композита разрабатывался с использованием полиэтилена (ПЭ) низкого давления высокой плотности фирмы «Lotte» HDPE BL5200 (Корея) и полимерного саженополненного компаунда на основе ПЭ низкого давления высокой плотности марки PRE-ELEC PE1296 фирмы Premix (Финляндия).

С целью обеспечить постепенное импортозамещение аналогичный материал разрабатывался с использованием сырья отечественного производства. С учетом распространенности и рекомендаций производителей для дальнейших исследований использовали ПЭ марки 273-83 (ПАО «Казаньоргсинтез»). Для придания материалу необходимых свойств использовали различные марки технического углерода (ТУ): СН85 (Омскарбон) и ПЗ99Э (ФГБУН Институт переработки углеводородов СО РАН, г. Омск). Для обеспечения равномерного распределения углеродного наполнителя в полимерной матрице, а также удовлетворительных технологических свойств и перерабатываемости в состав композита были введены следующие пластификаторы: стеариновая кислота (СК, ГОСТ 6484-96) и диоктилфталат (ДОФ, ТУ 2493-001-64112846-2010) в различных соотношениях.

В таблице 1 представлены результаты исследования физико-механических характеристик и объемного удельного электрического сопротивления

композитов, содержащих ТУ различных марок и пластификаторы.

Таблица 1. Физико-механические свойства и объемное удельное электрическое сопротивление полиэтиленовых электропроводящих композитов

Состав материала	σ_t , МПа	ϵ_p , %	ρ_v , Ом·см
273-83+20 мас.% СН85	28,5	42-590	$2,15 \cdot 10^4$
273-83+20 мас.% СН85+1,0 мас.%СК+5 мас.% ДОФ	22,4	622,8	$8,44 \cdot 10^2$
273-83+12,5 мас.% ПЗ99Э	27,5	50-280	$3,25 \cdot 10^5$
273-83+12,5 мас.% ПЗ99Э+1 мас.%СК+5 мас.% ДОФ	23,9	674,9	$2,29 \cdot 10^4$
273-83+15,0 мас.% ПЗ99Э+1,0 мас.%СК+5,0 мас.% ДОФ	24,0	614,7	$3,43 \cdot 10^2$

Примечание. σ_t — предел текучести; ϵ_p — удлинение при разрыве; ρ_v — объемное удельное электрическое сопротивление.

Установлено, что применение ТУ марки ПЗ99Э позволяет получить материал с удовлетворительными физико-механическими свойствами и электропроводностью уже при концентрации ТУ 12,5 мас.%, тогда как для получения того же комплекса свойств с применением ТУ марки СН85 требуется 20 мас.% наполнителя.

Поскольку разрабатываемые материалы предназначены для транспортировки топлив в условиях РС(Я) были проведены исследования их климатической стойкости, в том числе при взаимодействии с транспортируемой средой (топливом). Для исследования были выбраны частично импортозамещенные материалы состава 273-8/PE1296 50/50 мас.%, в том числе, содержащие климатические стабилизаторы марок СОЗ, СО4 и Стафен (Новосибирский институт органической химии СО РАН). Установлено, что наиболее эффективным стабилизатором разрабатываемого материала является СО4. После 18 месяцев экспонирования данный материал проявил стабильность во всем диапазоне исследованных характеристик. Кроме того, показано, что взаимодействие со средой бензина (АИ92) приводит к снижению показателя объемного удельного электрического сопротивления, т.е. к росту электропроводных свойств материала.

Таким образом разработан полиэтиленовый композиционный электропроводящий материал для топливных канистр, обладающий заданным комплексом физико-механических свойств, удовлетворительной электропроводностью и стойкостью к климатическим условиям РС(Я).

Работа выполнена по Госзаданию 0377-2018-0001.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПТФЭ С КОМБИНИРОВАННЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

А.П. Васильев¹, Т.С. Стручкова¹, А.А. Охлопкова^{1,2},
А.Г. Алексеев¹, П.Н. Гракович², С.А. Слепцова¹¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия; gtvar@mail.ru²Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия;³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. В настоящее время для улучшения свойств ПТФЭ, вводят волокнистые наполнители совместно с наночастицами [1, 2]. Это приводит к комплексному воздействию наполнителей на структуру материала, что существенно улучшает эксплуатационные свойства полимерного композиционного материала (ПКМ). В связи с этим, интерес представляет изучение известных наполнителей в комбинации и их влияние на свойства и структуру ПТФЭ.

Цель работы — исследование влияния комбинированных наполнителей (углеродные волокна (УВ) + вермикулит (Вл) + УПТФЭ) на физико-механические и триботехнические свойства политетрафторэтилена ПТФЭ.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 приведены результаты физико-механических и триботехнических характеристик ПТФЭ и ПКМ.

Таблица 1. Результаты физико-механических и триботехнических характеристик

Образец	σ_{pm} , МПа	ε_{pp} , %	I, мг/ч	f
Исходный ПТФЭ	21,0	320	120	0,22
ПТФЭ+1%УВ+1%Вл+1%УПТФЭ	19,0	345	0,48	0,28
ПТФЭ+3%УВ+1%Вл+1%УПТФЭ	18,5	360	0,24	0,27
ПТФЭ+5%УВ+1%Вл+1%УПТФЭ	18,2	330	0,15	0,27
ПТФЭ+8%УВ+1%Вл+1%УПТФЭ	18,0	339	0,12	0,27
ПТФЭ+10%УВ+1%Вл+1%УПТФЭ	17,0	328	0,13	0,29

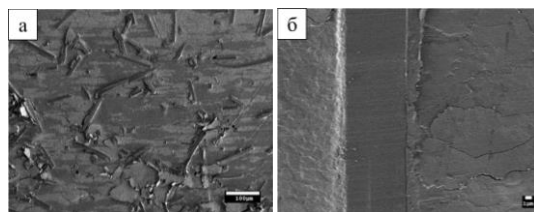
Примечание: σ_{pm} — прочность при растяжении; ε_{pp} — относительное удлинение при разрыве; I — скорость массового изнашивания; f — коэффициент трения.

При введении комбинированных наполнителей в ПТФЭ относительное удлинение при разрыве сохраняется на уровне исходного ПТФЭ. Прочность при растяжении ПКМ снижается с увеличением содержания УВ. Подобное изменение деформационно-прочностных свойств ПКМ, возможно, обусловлено сильным межмолекулярным взаимодействием модифицированных УВ и ПТФЭ [3].

Комбинированные наполнители положительно влияют на износостойкость материала. Скорость массового изнашивания ПКМ с увеличением содержания комбинированных наполнителей монотонно уменьшается в 1000 раз по сравнению с исходным ПТФЭ. Износостойкость максимума достигает при содержании 8 мас.% УВ + 1 мас.% Вл + 1 мас.%

УПТФЭ. Коэффициент трения композитов при содержании УВ от 3—8 мас.% повысилось на 22% по сравнению с ненаполненным ПТФЭ. Коэффициент трения ПКМ с содержанием 10 мас.% УВ выше на 31% относительно исходного полимера.

Для объяснения подобного изменения триботехнических характеристик материалов проведены структурные исследования их поверхности трения методом РЭМ (рис. 1).

Рис. 1. Микрофотография поверхности трения ПКМ при разных увеличениях: а) $\times 150$; б) $\times 3000$

Из рис. 1 видно, что на поверхностях трения композитов УВ распределены достаточно равномерно и ориентированы хаотично. При введении комбинированных наполнителей в ПТФЭ на поверхности трения между волокнами формируются вторичные структуры, возможно, это приводит к снижению контактного давления на отдельные волокна, что защищает поверхность материала от разрушения.

Таким образом, введение комбинированных наполнителей (УВ + Вл + УПТФЭ) приводит к существенному улучшению износостойкости ПТФЭ, при сохранении деформационно-прочностных характеристик.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке МНнВО РФ НИР № FSRG-2017-0021, FSRG-2017-0017, включенных в План НИР СВФУ на 2019

- Kandanur S. S. et al. Effect of activated carbon and various other nanoparticle fillers on PTFE wear // Tribology Transactions. — 2014 (57), no. 5, 821—830
- Österle W., Dmitriev A.I., Wetzel B., Zhang G., Häusler I., Jim B.C. The role of carbon fibers and silica nanoparticles on friction and wear reduction of an advanced polymer matrix composite // Materials & Design. — 2016 (93), 474—484
- Shelestova V.A., Zhandarov S.F., Danchenko S.G., Grakovich P.N. Surface modification of carbon fiber by fluoropolymer in a low-temperature plasma // Inorganic Materials: Applied Research. — 2015 (6), no. 3, 219—224

ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ

А.Л. Федоров¹, У.Р. Лугинова²

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия; gelvirb@mail.ru

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

Исследование процессов трения композитов на основе ПТФЭ методом ИК-спектроскопии и другими методами приведено во многих работах [1–4], в большинстве случаев интерпретация полученных данных ограничивается обнаружением определенных функциональных групп, преимущественно, продуктов окисления полимера. До недавних пор, мало кто из исследователей брался объяснять трибохимические процессы подробным образом, привести уравнения протекающих реакций с указанием образующихся продуктов. Харрис (Harris K.L.) и др. в [5] выдвигают предположения, наиболее четко и полно описывающие трибохимию при трении композитов на основе ПТФЭ. В настоящей работе представлены результаты исследования поверхностей трения композитов на основе ПТФЭ с различными наполнителями методом ИК-спектроскопии и приводятся аргументы в пользу однотипности протекающих реакций.

Материалы и методы. Триботехнические испытания проводили на универсальном трибометре UMT-2 фирмы CETR (схема «палец—диск», нагрузка при трении — 160Н, скорость скольжения — 0,2 м/с, путь трения — 2,7 км). Исследуемый образец — столбик диаметром 10 и высотой 20 мм; контртело — диск из стали 45 диаметром 75 мм с твердостью 45–50 HRC. Для получения ИК-спектров, использован ИК-спектрометр Varian 7000 FT-IR. Режимы съемки ИК-спектров: разрешение 8 см⁻¹, количество сканирований на получение одного усредненного спектра — 16.

Результаты и их обсуждение. Независимо от наполнителя ИК-спектры поверхностей трения композитов на основе ПТФЭ являются идентичными (рис. 1).

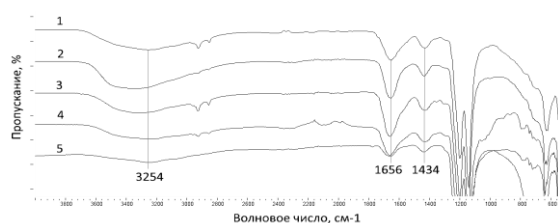


Рис. 1. ИК-спектры поверхностей трения композитов ПТФЭ: 1 — 5 мас.% Al₂O₃; 2 — 0,5 мас.% ТРГ + 1 мас.% нанопыль Mg; 3 — 5 мас.% каолин; 4 — 3 мас.% УВИС; 5 — 5 мас.% TiO₂

Подобную схожесть спектров можно объяснить только однообразностью протекающих реакций, которые приводят к образованию одних и тех же продуктов. Следует отметить, что наличие пиков (1430, 1650, 3250 см⁻¹) характерно только для

композитов ПТФЭ. На поверхности трения ненаполненного ПТФЭ эти пики отсутствуют. Появление пиков при частотах ~1430 и ~1650 см⁻¹ согласно [5] объясняется колебаниями С–О в, образующихся при трении, перфторкарбоксилатных солях. Эти соли представляют из себя продукт реакции перфторкарбоновых кислот с металлами или оксидами металлов, и имеют общую формулу Me₂(R_f-COO) [6]. Механизм образования данных солей представлен на рис. 2. Широкий пик при ~3250 см⁻¹ относится к –ОН группе появившейся в результате гидратации поверхности при трибохимических превращениях.

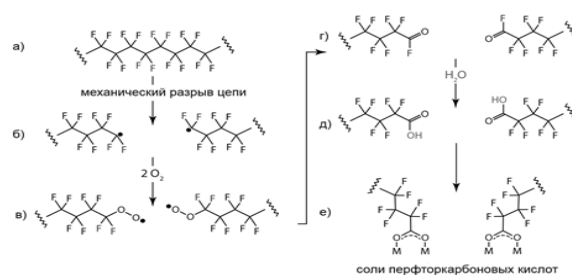


Рис. 2. Механизм образования солей перфторкарбоновых кислот при трении композитов ПТФЭ [5]

Заключение. Исходя из многолетних ИК-спектроскопических исследований поверхностей трения различных композитов на основе ПТФЭ, можно заключить, что химические превращения во время трения протекают однотипно независимо от вида наполнителя и приводят к образованию солей перфторкарбоновых кислот на поверхности трения композита.

- De-Li Gong, Bing Zhang, Qun-Ji Xue, Hong-Li Wang. Effect of tribochemical reaction of polytetrafluoroethylene transferred film with substrates on its wear behavior // *Wear*. — 1990 (137), 267–273
- Gao Jintang. Tribochemical effects in formation of polymer transfer film // *Wear*. — 2000 (245), 100–106
- Tasuku Onodera, Kenji Kawasaki, Takayuki Nakakawaji, Yuji Higuchi, Nobuki Ozawa. Tribocatalytic Reaction of Polytetrafluoroethylene Sliding on an Aluminum Surface // *J. Phys. Chem. C*. — 2015 (119), 15954–15962
- Shi-Quan Lai, Tong-Sheng Li, Xu-Jun Liu, Ren-Guo Lv. A Study on the Friction and Wear Behavior of PTFE Filled with Acid Treated Nano-Attapulgite // *Macromol. Mater. Eng.* — 2004 (289), 916–922
- Kathryn L. Harris, Angela A. Pitenis, W. Gregory Sawyer, Brandon A. Krick, Gregory S. Blackman, Daniel J. Kasprzak, Christopher P. Junk. PTFE Tribology and the Role of Mechanochemistry in the Development of Protective Surface Films // *Macromolecules*. — 2015, 48 (11), 3739–3745
- Pitenis, A.A., et al.: Ultralow wear PTFE and alumina composites: it is all about tribochemistry // *Tribol. Lett.* — 2015, 4 (57)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОГО ГИДРОСИЛИКАТА НАТРИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

А.В. Антусёва^{1,2}, Е.Ф. Кудина^{2,3}

¹Производственное объединение «Белоруснефть» БелНИПИнефть, Гомель, Беларусь; a.antuseva@beloil.by

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

³Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

В настоящее время большинство крупнейших в мире разрабатываемых месторождений, в частности в Республике Беларусь, выходят на поздние стадии производства, а их остаточные запасы классифицируют как трудноизвлекаемые. Высокоэффективным способом вовлечения в эксплуатацию таких объектов с дополнительной добычей нефти является применение физико-химических методов воздействия на пласт, направленных на повышение фильтрационно-сопротивления промытых каналов посредством их обработки гелеобразующими композициями.

Перспективным представляется использование состава, разработанного на основе дисперсного гидросиликата натрия и кислотного модификатора, что обусловлено технологичностью приготовления раствора с низкой вязкостью, селективностью водоизоляционных работ, высокими структурно-механическими характеристиками материала, способностью разрушаться под действием щелочного реагента и др. К достоинствам материала также относятся высокая термостойкость и экологичность [1, 2].

Установлено, что контакт с частицами породы значительно сокращает время гелеобразования, а в ряде случаев в пробах композиций без породы гель не образуется.

Цель исследований — оценить влияние минералогического и фракционного состава породы на характеристики органосиликатных гелей.

Материалы и методы.

В качестве гелеобразующей основы использовали дисперсный гидросиликат натрия (ГСН), а модификатора — сульфаминовую кислоту.

Исследования композиции проводили при контакте с карбонатной и терригенной породой. Структура образцов карбонатной породы (семилюкский горизонт, Тишковское месторождение, скв. № 9054 (РБ)) преимущественно представлена известняками и доломитами. Минералогический состав образцов терригенной породы (ланский горизонт, Ветхинское месторождение (РБ)) имеет песчаную основу с включениями зерен кварца, полевыми шпатами и продуктами их химического превращения. Молотую породу получали измельчением керна и отсевом фракций 0,07—0,25 мм, 0,25—0,50 мм и 1—2 мм, после чего вводили в пробы композиции (из расчета 10 г на 10 см³ жидкости). Структурно-механические свойства силикатных гелей, сформированных при 70 °С (имитирующую среднепластовую для белорусских месторождений), оценивали по изменению показателей прочности при пенетрации цилиндром с

помощью текстурометра ТА. ХТ. plus. Исследуемые образцы готовили по отработанной технологии.

Результаты и их обсуждение.

Установлено, что при введении разработанной композиции в пласт и нагревании под действием повышенной пластовой температуры кислотный агент инициирует процесс гелеобразования раствора смеси. В результате протекающих физико-химических взаимодействий в смеси формируется твердый гидрогель с однородной структурой во всем объеме и высокой плотностью упаковки молекул гелеобразователя.

Проведена оптимизация концентрационного состава гелеобразующей композиции по комплексу технических критериев с учетом геологических особенностей объекта воздействия. Установлены зависимости времени гелеобразования раствора композиции и прочности гелей, полученных на основе модифицированного ГСН, от соотношения исходных реагентов и температуры.

Анализ кривых пенетрации показал практически идентичное поведение при нагружении гелей, сформированных в контакте с карбонатной или терригенной породой одинаковой фракции. Однако увеличение дисперсности частиц породы одного минералогического состава приводит к повышению прочности сформированного геля, что обусловлено более высокой удельной площадью поверхности частиц. Очевидно, частицы породы являются активными центрами гелеобразования.

Выводы.

Таким образом, разработанная гелеобразующая композиция на основе дисперсного гидросиликата натрия, модифицированная сульфаминовой кислотой, может эффективно использоваться в технологиях повышения нефтеотдачи пластов с различной минералогической составляющей посредством закачки через нагнетательную скважину для увеличения добычи нефти и сдерживания темпов обводнения продукции добывающих скважин.

1. Антусёва А.В., Кудина Е.Ф., Печерский Г.Г. Гелеобразующие материалы для повышения нефтеотдачи пластов в условиях высокотемпературных коллекторов // Нефтяник полясья. — 2018 (34), № 2, 68-75
2. Антусёва А.В., Кудина Е.Ф. Композиционные материалы водоизоляционного назначения в технологиях нефтедобычи (обзор) // Полимерные материалы и технологии. — 2018 (4), № 4, 6—28

МУЛЬТИСЛОЙНЫЕ ПЛЕНКИ ПРИВИТЫХ СОПОЛИМЕРОВ ХИТОЗАНА,
РЕЗИСТЕНТНЫЕ К АДСОРБЦИИ БЕЛКОВ

Т.Г. Шутова, К.С. Ливонович

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; shutova@ichnm.basnet.by

Покрyтия на основе сополимеров полиэлектролитов с гидрофильными неионогенными олигомерами характеризуется высокой стойкостью к адсорбции белков и усиливают коллоидную устойчивость нанокапсул в физиологически релевантных средах.

Цель работы: получить мyльтислойные покpытия на основе привитых сополимеров хитозана с различными боковыми цепями (CH-Sub, где Sub — декстран (DEX), полиэтиленгликоль (PEG), поливиниловый спирт (PVA), поливинилпирролидон (PVP)), и декстран сульфата (DS) и установить параметры, определяющие высокую резистентность их поверхности к адсорбции белков. Возможность варьирования Sub и степени замещения аминокрупп (χ) в сополимерах, числа бислоев (n) в пленках позволяет контролировать толщину и степень перекрытия боковых цепей на поверхности пленок и, следовательно, адсорбцию белков.

Материалы и методы. Соплимеры CH-PEG получали из хитозана 450 кДа и карбоксилированных PEG 0,9 и 5 кДа в фосфатном солевом буфере (pH 7,4), используя 1-этил-3-(3-диметиламинопропил)карбодиимид (EDC) и N-гидроксисульфосукцинимид (sulfo-NHS) в качестве сшивающих агентов [1]. Для CH-PVP и CH-PVA синтезировали олигомеры PVP 2,0 и 3,5 кДа и PVA 1,8 кДа с концевой карбоксильной группой и использовали EDC в 0,2 M NaCl, pH 4,7. Соплимеры CH-DEX получены аминированием концевой альдегидной группы декстрана 6,0 кДа аминокгруппой хитозана с использованием борцианогибрида натрия [2]. Величина χ в сополимерах, определенная по методике [1], варьировалась от 0,01 до 0,25.

Закономерности формирования пленок (CH-Sub/DS) $_n$, где $n=3,5-7,5$, изучали методом кварцевого микровзвешивания с мониторингом резонансного сопротивления (QCM-R) на приборе QCM200 SRS с проточной ячейкой. После формирования методом послойной сборки [1-3] на поверхности резонатора с частотой 5 МГц покpытия с заданным числом бислоев CH-Sub/DS, ячейку заполняли эмбриональной телячьей сывороткой (ЭТС) на 1 ч. Массу адсорбата рассчитывали по уравнению Сауэрбрея, плотность адсорбата — 1,3 г/см³.

Результаты и их обсуждение. Анализ кривых в координатах $\Delta F/\Delta R$ показал, что все исследованные пленки (CH-Sub/DS) $_n$ являются жесткими. Отношение $\Delta F/\Delta R$ сравнимо с величиной для пленок хитозан/DS или меньше (для Sub=DEX).

Толщина пленок (CH-Sub/DS) $_n$, увеличивается с ростом n . Толщина бислоя CH-Sub/DS находится в диапазоне от 1,2 до 3,4 нм и зависит от Sub и степени замещения. Для Sub = DEX, PVP, PVA толщина бислоя с ростом χ уменьшается на 5–60% по сравнению с хитозаном. Для PEG-привитых хитозанов толщина бислоя минимальна при $\chi = 0,04-0,05$. Содержание воды в пленках на основе PEG и DEX составляет 85±5% [3].

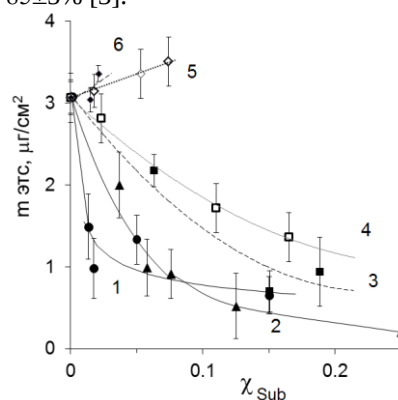


Рис. 1. Адсорбция белков ЭТС на поверхности пленок (CH-Sub/DS) $_{5,5}$ с различной степенью замещения аминокгрупп. Sub: 1 — PEG 5 кДа; 2 — PEG 0,9 кДа; 3 — DEX 6 кДа; 4 — PVA 1,8 кДа; 5 — PVP 3,5 кДа; 6 — PVP 2,0 кДа.

Для немодифицированного хитозана влияние числа бислоев хитозан/DS в пленке на адсорбцию белков ЭТС на поверхности практически отсутствует. Соплимеры хитозана с PEG, DEX и PVA снижают массу адсорбата на поверхности пленки (CH-Sub/DS) $_n$, содержащей 5,5 бислоев на 10–85% по сравнению пленками (хитозан/DS) $_n$ (рис. 1). С точки зрения параметра перекрытия боковых цепей $L/2R_g$, сополимеры DEX и PEG одинаково эффективны для придания поверхности резистентности к адсорбции белков [3]. CH-PVP усиливают адсорбцию белка на поверхности пленок (рис. 1) из-за комплексообразования альбумина и PVP.

1. Шутова Т. Г., Шеремет А. А., Ливонович К. С. Адсорбция белков сыворотки крови на мyльтислойных пленках модифицированных полиэтиленгликолем полисахаридов // Труды БГУ. — 2016 (11), Ч. 1, 258–266
2. Ливонович К. С. Синтез привитых сополимеров декстрана и хитозана и свойства мyльтислойных пленок на их основе // Прил. к журн. «Весті НАН Беларусі: сер. хім. навук». — 2016. Ч. 1, 52–57
3. Shutava T. G., Livanovich K. S., Sharamet A. A. Layer-by-layer films of polysaccharides modified with polyethylene glycol and dextran // Colloids and Surf. B. — 2019 (173), № 1, 412–420

НОВЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ С АНТИМИКРОБНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-L-ЛАКТИДА

Г.В. Бутовская¹, А.А. Федоренко^{1,2}, Л.П. Круль^{1,2},
В.А. Тарасевич³, В.А. Добыш³, А.Г. Любимов⁴, Н.А. Белясова⁴

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; galina_butovskaya@mail.ru

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁴Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

В настоящее время возрастает потребность в биоразлагаемых полимерных упаковочных материалах, отвечающих основным требованиям к упаковке (увеличение сроков хранения пищевой продукции и защита от микробов) [1]. Новым вариантом упаковки является активная упаковка, содержащая противомикробные препараты с пониженным уровнем их вымывания.

Цель работы — создание пленочных материалов с антимикробными свойствами на основе поли-L-лактида (П-L-Л) и производных полигексаметиленгуанидина (ПГМГ).

Материалы и методы. Исследовали промышленный П-L-Л марки 4043D («Nature Works LLC», США) с содержанием 4,6% D-изомера. Порошок П-L-Л получали криогенным диспергированием гранул. Пленки П-L-Л с добавками биоцида (гидрохлорида или стеарата ПГМГ) получали методом экструзии расплава порошка полимера в двушнековом приборе Rondol, толщина пленок составляла 40—60 мкм. Содержание биоцида в экструдированных пленках варьировали от 0 до 2 мас.%. Для сравнения формировали пленки из раствора П-L-Л в хлороформе с добавками стеарата ПГМГ.

За изменением содержания D-изомера (X) в макромолекулах П-L-Л следили методом поляриметрии (автоматический поляриметр AP-300, ATAGO, Япония). ИК спектры пленок записывали на Фурье-ИК спектрометре ALPHA (BRUKER Optik GmbH) с приставкой НРВО АTR Di через 2 см⁻¹ в диапазоне 4000—400 см⁻¹, 24 скана. Разложение сложного контура перекрывающихся полос проводили, используя программу Peak Separation «Netzsch—TA4». Антимикробную активность пленок изучали суспензионным методом по отношению к грамотрицательным (*Escherichia coli*) и грамположительным (*Staphylococcus aureus*) бактериям.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Обнаружено, что в порошке П-L-Л, полученном криогенным помолотом гранул, содержатся полимерные пероксиды и измерено их содержание. При термическом разложении пероксида в экструдере образуются макрорадикалы в α-положении с С=О группе. В процессе реакционной экструзии порошка формируется «микрогель», содержание которого в пленках составляет 6%. Показано, что в количестве «микрорегеля» в экструдированных пленках снижает-

ся с увеличением концентрации гидрохлорида ПГМГ. Это свидетельствует о протекании при температуре экструзии конкурирующих реакций двух типов: 1) рекомбинация алкильных макрорадикалов, приводящая к сшиванию П-L-Л, и 2) взаимодействие алкильных макрорадикалов П-L-Л с концевой NH₂ группой гидрохлорида ПГМГ, сопровождающейся появлением заместителя в боковой цепи полимера.

Установлено, что в пленках П-L-Л, полученных экструзией в отсутствие добавок, в растворимой в хлороформе части пленки величина X равна нулю, т.е. практически весь D-изомер содержится в «микрорегеле». Это означает, термическим превращениям с участием свободных радикалов подвергается в основном аморфная фаза, содержащая D-изомер. При введении добавок гидрохлорида ПГМГ значение X увеличивается с ростом содержания биоцида в пленке, что еще раз свидетельствует о конкуренции вышеупомянутых реакций. Взаимодействие макрорадикалов с концевой NH₂ группой гидрохлорида ПГМГ приводит к иммобилизации биоцида в матрице полимера.

Известно [2], что наличие заместителя в боковой цепи стереорегулярного полилактида влияет на конформацию макромолекулы. Впервые методом ИК спектроскопии нами доказано изменение конформационного состава П-L-Л в пленках, полученных методом реакционной экструзии расплава в присутствии биоцида, и отсутствие изменения конформации при формировании пленок из раствора порошка П-L-Л в хлороформе при комнатной температуре.

Показано, что с увеличением количества биоцидного агента в пленках снижается концентрация сохранивших жизнеспособность бактерий (как грамположительных, так и грамотрицательных) на поверхности пленок: фактор редукции равен примерно 3,0 уже при содержании гидрохлорида ПГМГ в пленке, начиная с 0,8%.

1. Rodríguez-Núñez, J. R., Madera-Santana, T. J., Burrola-Núñez, H., Martínez-Encinas, E. G. Composite materials based on PLA and its applications in food packaging. In: Composites Materials for Food Packaging / Eds. G. Cirillo [et al.] : Scrivener Publishing LLC. — 2018
2. Nandel F.S., Garla R. Conformational behavior of stereo regular substituted polyglycolides is side chain dependent // J. Biophys. Chem. — 2011 (2), № 3, 285—299

ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ
АРМИРУЮЩЕЙ НИТИ В АРМИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ТРУБЕС.Ф. Жандаров¹, А.С. Васильева²¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь;
serge.zhandarov@gmail.com²ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», г. Москва, Россия

В последнее время для транспортировки нефти, природного газа, технологических жидкостей все шире применяют армированные полимерные трубы. Важнейшим способом их армирования является создание каркаса из высокопрочных нитей, лент, жгутов, наносимых на трубу чаще всего в форме сетки методами обмотки или оплетки непосредственно перед формированием наружной оболочки [1]. Для сохранения прочностных свойств трубы в условиях эксплуатации необходимо обеспечить достаточный уровень физико-механического взаимодействия (адгезия, трение) армирующих элементов с материалом трубы.

Адгезионную прочность и межфазное трение между полимерными матрицами и армирующими нитями обычно оценивают с помощью методов вытягивания (microbond и pull-out) [2, 3]. Нить, погруженную в матрицу на определенную глубину, вытягивают с помощью разрывной машины, записывая при этом кривую удлинение—нагрузка, по характерным точкам которой затем рассчитывают параметры межфазного взаимодействия (локальную адгезионную прочность τ_d и касательное напряжение при трении τ_f) [3]. Однако существующие модели обработки кривых удлинение—нагрузка предполагают, что погруженный участок нити прямолинеен. В данной работе оценку межфазных параметров производили, вытягивая нить непосредственно из армированной трубы, поэтому в уравнение баланса сил вводили дополнительное слагаемое, учитывающее трение на искривленном участке, описываемое формулой Эйлера [4].

При вытягивании нити из матрицы измеряют три характерные силы: силу начала отслаивания F_d , максимальную силу $F_{\max}$ и силу трения после завершения вытягивания F_b . Теория дает зависимость этих сил от текущей длины трещины (рис. 1). При этом кривая 1 для прямолинейной нити полностью определяется двумя межфазными параметрами τ_d и τ_f , а кривая 2 для искривленной нити — еще и коэффициентом трения μ . Поэтому, решив для экспериментальной кривой систему уравнений $\vec{F} = \vec{F}(\vec{\tau})$, где $\vec{F} = \{F_d, F_{\max}, F_b\}$, $\vec{\tau} = \{\tau_d, \tau_f, \mu\}$, можно найти значения межфазных параметров τ_d , τ_f и μ для данного образца.

Экспериментальную оценку межфазных параметров производили для труб из сшитого ПЭ различных диаметров, армированных комплексными нитями из кевлара различного диаметра (с разным количеством элементарных волокон). Полученные результаты приведены в табл. 1.

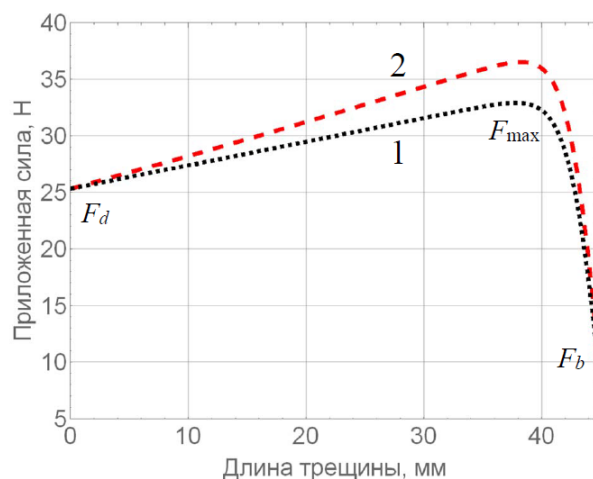


Рис. 1. Взаимосвязь между приложенной силой и длиной трещины при вытягивании нити из ПЭ матрицы: 1 — прямолинейная нить; 2 — намотанная на трубу

Значения локальной адгезионной прочности τ_d находятся в диапазоне 3–12 МПа, что свойственно неполярному ПЭ. Они слабо зависят от диаметра трубы, но сильно коррелируют с диаметром (тексом) армирующей нити. Касательное напряжение при трении τ_f составило 0,3–0,6 МПа, что также характерно для ПЭ. Дополнительное трение на искривленных участках было очень нестабильно и характеризовалось значительным разбросом. Возможно, это связано с короткой погруженной длиной нити (около 40 мм). Для более корректной оценки его вклада требуются дополнительные исследования.

Таблица 1. Параметры прочности и трения в системе сшитый ПЭ + нить из кевлара для труб разного диаметра

Диаметр трубы, мм (внешн. / внутр.)	Жгут: текс / Ø, мм	τ_d , МПа	τ_f , МПа	Коеф. трения
32 / 27	250 / 0,50	$6,6 \pm 3,0$	$0,37 \pm 0,12$	0
47 / 39	110 / 0,33	$12,0 \pm 4,9$	$0,29 \pm 0,18$	$0,35 \pm 0,32$
70 / 60	501 / 0,71	$2,5 \pm 0,4$	$0,34 \pm 0,08$	$0,01 \pm 0,01$
84 / 70	501 / 0,71	$3,5 \pm 0,8$	$0,21 \pm 0,05$	$0,48 \pm 1,06$
100 / 87	660 / 0,81	$4,3 \pm 2,3$	$0,37 \pm 0,25$	$0,43 \pm 0,62$
145 / 127	501 / 0,71	$4,3 \pm 1,8$	$0,58 \pm 0,23$	0

1. Шаляпин С.В., Гвоздев И.В., Симонов-Емельянов И.Д. Вестник МИТХТ 2012 (7), № 4, 111–115.
2. Zhandarov S., Mäder E., Scheffler C., Kalinka G., Poitzsch C., Fliescher S. // Adv. Ind. Eng. Polym. Res. — 2018 (1), no. 1, 82–92
3. Zhandarov S., Mäder E., Gohs U. // Materials. — 2018, no. 11, 2406.
4. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. — М.: Высш. шк. — 1986

АНИОННАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ С РАСКРЫТИЕМ ЦИКЛА ГЕКСАФТОРПРОПИЛЕНОКСИДА

С.В. Костюк,^{1,2,3} И.В. Василенко,¹ F. Ganachaud³

¹Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь; kostjuks@bsu.by

²Химический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

³INSA-Lyon, IMP, CNRS, UMR5223, Villeurbanne, France

Введение.

Перфторполиэфиры представляют собой особый класс жидких фторполимеров, которые характеризуются высокой термической стабильностью, химической стойкостью, низкими поверхностным натяжением и температурой стеклования. Эти уникальные свойства определяют использование перфторполиэфиров в авиа- и ракетостроении, в электронике, в качестве жидкостей для диффузионных насосов, смазок и рабочих жидкостей в вакуумных насосах [1, 2]. Перфторполиэфиры получают сополимеризацией тетрафторэтилена и гексафторпропилена (Fomblin, Solvay Solexis) в присутствии кислорода под действием УФ-излучения [1]. Альтернативная технология получения перфторполиэфиров заключается в анионной полимеризации с раскрытием цикла (AROP) гексафторпропиленоксида (HFPO) с использованием комплекса фторида цезия с тетраглимом (TG) в качестве инициатора полимеризации и фреонов (хлорфторуглеродов) (Krytox, DuPont, USA; Aflunox, Nippon Mektron, Japan) [2]. Учитывая высокую токсичность солей тяжелых металлов и хлорфторуглеродов, целью данной работы являлась разработка более экологичной методики получения полигексафторпропиленоксида, с одной стороны. С другой стороны, важной задачей данного исследования являлось получение полигексафторпропиленоксида с $M_n > 1500$ г/моль, не содержащего примесей токсичных низкомолекулярных ($DP_n < 5$) перфторполиэфиров.

Результаты и их обсуждение.

Первой стадией исследований была оценка возможности замены фторида цезия на менее токсичный фторид металла, а также хлорфторуглеродов на $C_4F_5H_5$. Было показано, что конверсия мономера уменьшается в ряду $CsF > KF > NaF$, что согласуется с повышением энергии кристаллической решетки фторида металла (MF) (табл. 1).

С другой стороны, степень полимеризации (DP_n) увеличивается при переходе от CsF к KF , а затем сильно уменьшается (табл. 1). Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения KF в качестве инициатора полимеризации и $C_4F_5H_5$ в качестве растворителя, хотя выход полимера в этом случае ниже, чем при использовании фреона R-113 (~98%).

Как следует из табл. 2, повышение температу-

ры реакции с -35 °C до 0 °C способствует повышению выхода полимера и среднечисловой молекулярной массы, а также снижению фракции олигомерного побочного продукта. Дальнейшего повышения молекулярной массы полимера и снижения примесей олигомерных продуктов можно добиться за счет увеличения соотношения мономер/инициатор. Все синтезированные полимеры характеризуются низкой полидисперсностью ($M_w/M_n \leq 1.1$) (табл. 2).

Таблица 1. Полимеризация HFPO в присутствии различных фторидов металлов (MF)

MF	ЭКР ^a (ккал/моль)	Выход (%)	DP_n (GC) ^b	DP_n (ЯМР) ^a
CsF	176	56	1.9	1.7
KF	192	53	6.9	7.7
NaF	215	12	1.0	-

Примечание. Условия: $[MF]/[TG]=1:1.8$; $[HFPO]/[MF]=15$; -35 °C; 2 ч. ^a Энергия кристаллической решетки. ^b По данным газовой хроматографии; ^a По данным ^{19}F ЯМР спектроскопии.

Таблица 2. Полимеризация HFPO в системе $KF/TG/C_4F_5H_5$ при различных температурах

T (°C)	$[HFPO]/[KF]$	Выход (%)	M_n^a (ЯМР)	M_w/M_n^b	$DP_n < 5^b$ (%)
-35	15	53	1620	1.07	20.5
-15	15	88	2020	1.10	14.3
0	15	89	2050	1.08	10.5
0	40	89	2500	1.10	6.9
0	60	92	2330	1.08	4.0

Примечание. Условия: $[MF]/[TG]=1:1.8$; 2 ч. ^a По данным ^{19}F ЯМР спектроскопии. ^b По данным газовой хроматографии.

Таким образом, нами была разработана новая иницирующая система $KF/TG/C_4F_5H_5$, позволяющая синтезировать полигексафторпропиленоксид с контролируемой молекулярной массой ($M_n \leq 2500$ г/моль), низкой полидисперсностью ($M_w/M_n \leq 1.1$) и низким содержанием олигомерных продуктов ($\leq 4\%$) при 0 °C.

Работа выполнена при финансовой поддержке компании Clariant Co.

1. Kasai P. H. Perfluoropolyethers: intramolecular disproportionation // *Macromolecules*. — 1992 (25), 6791—6799
2. Kostjuk S.V., Ortega E., Ganachaud F., Ameduri B., Boutevin B. Anionic ring-opening polymerization of hexafluoropropylene oxide using alkali metal fluorides as catalysts: a mechanistic study // *Macromolecules*. — 2009 (42), 612—619

ПЬЕЗОУПРУГИЙ ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Д.А. Черноус

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

Введение. Одно из перспективных направлений использования анодного оксида алюминия (АОА) состоит в изготовлении на его основе микро-электронных датчиков давления. При этом нанопористое покрытие импрегнируется полимером, реализующим прямой пьезоэлектрический эффект. Ранее авторами была разработана методика прогнозирования механических параметров покрытия, получаемого при импрегнировании АОА полимером [1]. Однако, показатели, определяющие эффективность использования таких покрытий в качестве датчиков давления, изучены недостаточно полно.

Целью настоящего исследования является разработка механико-математической модели импрегнированного полимером нанопористого АОА, позволяющей описать процесс реализации прямого пьезоэффекта в полимерном наполнителе.

Упрощенная постановка задачи электрору-гости. Физические уравнения электрору-гости материала без учета намагничиваемости и влияния температуры можно записать в виде [2]

$$D_i = \lambda_{ij} E_j + e_{inm} \varepsilon_{nm}, \sigma_{ij} = C_{ijnm} \varepsilon_{nm} - e_{rij} E_r. \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} , ε_{ij} — компоненты тензоров напряжений и деформаций; D_i , E_i — компоненты векторов индукции и напряженности электрического поля; C_{ijnm} , e_{ijr} , λ_{ij} — компоненты тензоров модулей упругости, пьезоэлектрических постоянных и диэлектрической проницаемости соответственно. Сформулированная связанная задача упрощается, если имеется возможность решение системы уравнений Максвелла для вектора индукции принять в виде

$$D_i = 0. \quad (2)$$

При этом из первых трех уравнений системы (1) выразим компоненты вектора напряженности E и подставим в оставшиеся шесть физических уравнений. Таким образом, допущение (2) позволяет свести связанную задачу электрору-гости к задаче теории упругости при измененных значениях модулей C_{ijnm} с последующим вычислением компонент напряженности электрического поля.

Расчет чувствительности датчика. В качестве материала наполнителя нанопористого АОА используем поливинилиденфторид (ПВДФ), характеристики которого приведены, в частности, в работе [3]. Материалы матрицы (АОА) и положки (алюминий) рассматриваются как изотропные линейно упругие [1]. Простейшая конструкция датчика дав-

ления представляет собой двухслойную пластину, расположенную на недеформируемом основании. Верхний слой — импрегнированный АОА. Нижний слой — алюминиевая подложка.

Задача теории упругости для покрытия при действии равномерно распределенного давления решается в рамках трехфазной модели композита [1]. Определив компоненты тензора деформаций для полимерного наполнителя, вычисляем компоненты вектора E , а затем — усредненную по поверхности датчика разность потенциалов. В качестве функциональной характеристики датчика будем использовать удельную чувствительность Q , равную отношению разности потенциалов к давлению и общей толщине датчика. На рисунке 1 представлены расчетные зависимости Q от объемной доли ПВДФ c .

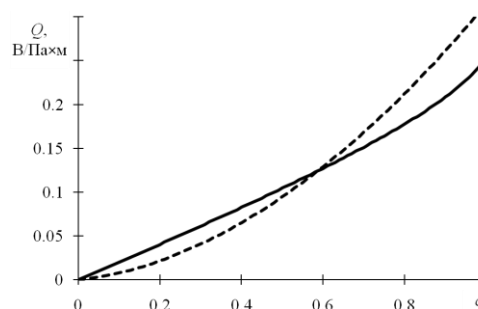


Рис. 1. Зависимость удельной чувствительности датчика от объемной доли наполнителя. Сплошная кривая — при отсутствии сцепления датчика с основанием; пунктирная — при наличии адгезионной связи с основанием

Заключение. Разработана методика расчетного определения чувствительности пьезоэлектрического датчика давления, представляющего собой пластину из нанопористого АОА, импрегнированного ПВДФ. Установлено, что для рассматриваемой пластины, свободно лежащей на основании, чувствительность прямо пропорциональна объемной доле полимера. Для адгезионно связанной с основанием пластины зависимость чувствительности от доли наполнителя близка к квадратичной.

1. S.V. Shil'ko [et al.] Estimation of the Friction Coefficient of a Nanostructured Composite Coating // *Mechanics of Composite Materials*. — 2017 (53), no. 5, 579—588
2. Партон В.З., Кудрявцев Б.А. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. — М.: Наука. — 1988
3. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidenefluoride // *J. Acoust. Soc. Amer.* — 1981 (70), no. 6, 1596—1608

ПОЛУЧЕНИЕ СОПОЛИМЕРА СТИРОЛА С МАЛЕИНОВЫМ АНГИДРИДОМ
В СРЕДЕ ЛЕСОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРИТЕЛЯ

Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич, Н.Г. Козлов, А.Ю. Клюев

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

Центральным научно-исследовательским и проектным институтом лесохимической промышленности (г. Горький, СССР) впервые еще в 80-е гг. XX века проводились пути поиска заменителей канифоли. В результате чего были разработаны способы получения сополимера стирола и малеинового ангидрида [1] и вторичных продуктов на его основе, нашедших применение в клеевых составах [2], в лакокрасочной [3], резинотехнической [4] и нефтяной [5] промышленности.

Полученный сополимер — стиромаль — обладал высокими физико-химическими свойствами: температурой размягчения $T_p \geq 150,0$ °С и кислотным числом $KЧ = 500,0$ мг КОН/г.

В настоящее время известны и широко распространены технологии в среде ароматических и неароматических высококипящих растворителей. Данные способы обладают рядом недостатков: невысокий выход конечного продукта, расход растворителей, многостадийность получения, взрыво- и пожароопасность. При получении вторичных продуктов на основе стиромали [1—3] технология предусматривала дополнительные стадии: отгонка растворителя из раствора стиромали до массовой доли сухих веществ 50—60 мас.%; модификацию сконцентрированного стиромали.

В связи с этим актуален поиск и исследование новых способов получения и модификации стиромали для получения новых соединений с заданными свойствами.

Впервые в мировой практике лесохимии в качестве заменителей канифоли был предложен новый малеиновый аддукт — канифолетерпеностирольно-малеиновая смола (КТСМС) [6]. Суть способа: в качестве растворителя используется терпентин, а конечным продуктом являются многокомпонентный сплав из малеопимаровой кислоты, аддуктов терпеновых углеводородов с МА, стиромали и смоляных кислот, не реагирующие с МА. Предлагаемый продукт синтезируют на основе доступного и достаточно дешевого сырья, его технология не требует дополнительных капитальных вложений. КТСМС — твердые стекловидные вещества светло-желтого цвета, растворимы в спиртах, эфирах и ацетоне.

Условия синтеза: температура $T_{реак.} = 190 \pm 2$ °С, продолжительность $\tau = 9$ ч. Реакцию считали законченной, когда в реакционной смеси содержалось не более 2,0 мас.% свободного несвязанного МА. Отгонка остатков непрореагировавших компонентов производилась при давлении $P = 0,0026$ МПа. Используемый в синтезе терпентин имеет следующий групповой состав: 60,0 мас.% смоляных кислот (из них 44,0% смоляные кислоты с сопряженными двойными связями) и 40,0 мас.% скипидара. Со-

отношение исходных компонентов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Состав реакционной смеси

Состав реакционной смеси, мас.%		Выход, %
терпентин/стирол	малеиновый ангидрид	
100/0	43,0	91,0
95/5	46,0	93,6
90/10	50,0	94,0
80/20	55,0	95,0
70/30	60,0	96,0
60/40	65,0	97,0
50/50	71,0	98,0
40/60	77,0	98,0
30/70	83,0	99,0

При уменьшении в реакционной смеси массы терпентина и увеличении количества вводимого стирола и малеинового ангидрида по отношению ко всей реакционной смеси приводит к росту физико-химических показателей и увеличению выхода целевого продукта. Дальнейшее варьирование содержания в реакционной смеси терпентина и стирола в сторону увеличения содержания последнего приводит к образованию высокоплавких продуктов, получение которых затруднено и нецелесообразно.

Целенаправленным химическим модифицированием КТСМС, используя реакции имидизации, амидизации, этерификации, солеобразования, конденсации и т.д., можно получать широкий спектр новых функциональных, биологически безопасных продуктов и композиционных составов целевого назначения. Новый эффективный лесохимический продукт по своим физико-химическим свойствам не уступает, а по некоторым показателям превосходит известные канифоль, канифольномалеиновый, канифолетерпеномалеиновые и терпеномалеиновые аддукты.

1. Полуйко Е. Г., Афанасьева В. В., Белобородова Л. Г., Колесова И. И. Способ получения сополимера стирола с малеиновым ангидридом / а.с. SU 730709, 1980
2. Крылатов Ю. А., Волков В. А., Лихтман М. И. Состав для проклейки бумажной массы / а.с. SU 502995, 1976
3. Падерин В. Я., Дюдькова Н. А., Виноградова Н. Л. Опытнo-промышленная выработка эфиров стиромали для лакокрасочной промышленности // Гидролизная и лесохимическая промышленность. — 1991 (6), 18—19
4. Справочник лесохимика / Под ред. С. В. Чудинова, — М.: Лесная промышленность. — 1987
5. Акчурина Д. Х., Пузин Ю. И., Ягафарова Г. Г., Сафаров А. Х., Федорова Ю. А., Ягафарова Д. И. Новый полимер для буровых растворов // Башкирский химический журнал. 2014 (21, 3), 124—128
6. Клюев А. Ю., Агабеков А. Е., Пучкова Н. В., Прокопчук Н. Р., Мулярчик В. В., Данишевский В. Н. Канифолетерпено-стирольно-малеиновая смола и способ ее получения / Патент ВУ 10641, 2007

КАЧЕСТВЕННЫЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА-4 С МАЛОЙ СТЕПЕНЬЮ НАПОЛНЕНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

А.Л. Башлакова

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

При разработке полимерных композитов особое значение имеет получение армированных пластиков и наполненных полимеров, в которых процессы структурообразования протекают в присутствии сильно развитой поверхности волокнистого наполнителя. Слой полимера около поверхности раздела фаз, так называемый граничный слой, отличается по своим свойствам и структуре от основной массы полимера. Вопрос о природе и толщине этого слоя представляет большой интерес и является одной из основных проблем теории наполненных полимеров. Именно через этот слой происходит передача механической нагрузки, а, следовательно, зависят механические свойства наполненных материалов.

До сих пор еще мало исследованы процессы структурообразования политетрафторэтилена (ПТФЭ) в присутствии волокнистых наполнителей. ПТФЭ отличается от большинства термопластичных полимеров уникальной химической инертностью, высокой вязкостью расплава, что осложняет его взаимодействие с поверхностью наполнителя и образование граничных слоев.

Цель работы: исследование структуры граничных слоев, образующихся на границе раздела между углеродными волокнами и политетрафторэтиленом при формировании из них композиционного материала, с разной степенью наполнения композита.

Материалы и методы.

Объектом исследования являлись композиционные материалы с матрицей из ПТФЭ, армированной измельченными углеродными волокнами на основе вискозной технической нити. Порошок ПТФЭ марки ПН ГОСТ 10007–80 был произведен ОАО «Галополимер» (г. Пермь, Россия); углеродные волокна в виде ленты ЛО-12Н/160 ТУ РБ 400031289.170–2001 получали в ОАО «СветлогорскХимволокно» (г. Светлогорск). Исследовали композиты со степенью наполнения 1, 2, 3, 5, 7 мас.% и не наполненный ПТФЭ. Для улучшения адгезии между матрицей и наполнителем, углеволокна были обработаны в низкотемпературной плазме тлеющего разряда в среде фторсодержащих соединений. Композиционный материал получен смешением и прессованием порошка ПТФЭ и измельченных углеродных волокон с последующим

спеканием.

Степень кристалличности ПТФЭ определяли методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре. GNR APD 2000 PRO (G.N.R. Analytical Instruments Group, Италия).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены типичные для исследуемых материалов дифракционные кривые. Степень кристалличности ПТФЭ определяется пиком, имеющим максимум при угле рассеяния 18° .

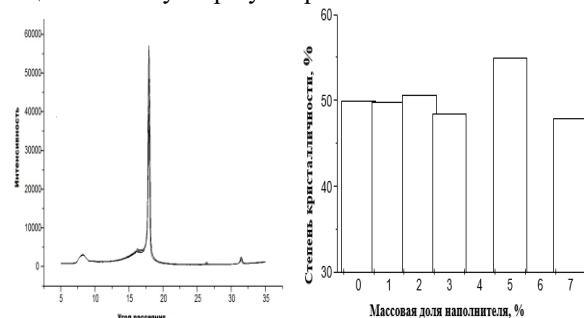


Рис. 1. Дифракционные кривые для ПТФЭ с различной степенью наполнения модифицированными углеволокнами

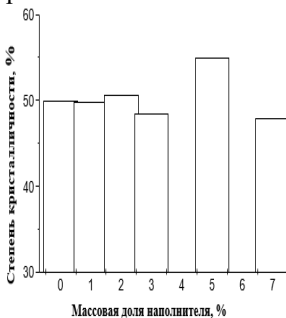


Рис. 2. Диаграммы зависимости степени кристалличности ПТФЭ от массового содержания наполнителя

После аппроксимации фона были определены площади кристаллической (I_K) и аморфной (I_A) областей. Степень кристалличности полимера рассчитана по формуле:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_K + I_A}.$$

Установлено, что при увеличении степени наполнения композита модифицированными углеволокнами незначительно меняется степень кристалличности в сторону уменьшения (рис. 2). По-видимому, это связано с формированием аморфной фазы в граничном слое вблизи поверхности наполнителя, что приводит к снижению общей степени кристалличности композита.

1. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. — М.: Машиностроение. — 2005

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОЛКОВЫХ ДЕТАЛЯХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ХЛОПКОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Н.С. Абед, Ш.О. Эминов, Г. Гулямов

Государственное унитарное предприятие «Фан ва таракиёт» (Наука и Прогресс) Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

В настоящее время на хлопкоочистительных заводах и заготовительных пунктах широко эксплуатируются различные машины и механизмы, такие как передвижные перегружатели хлопка, разборщики бунтов хлопка и туннелеройные машины. Рабочие органы этих машин и механизмов снабжены зачерпывающими элементами, выполненными в виде колков, имеющих различные формы: цилиндрические, копьевидные и конические.

Анализ условий эксплуатации колковых рабочих органов машин и механизмов, взаимодействующих с хлопком-сырцом, показал, что они имеют недостатки, основными из которых являются: низкая захватывающая способность колкового рабочего органа, и, как следствие, снижение производительности механизмов и увеличение простоя хлопкоперевозящих средств под разгрузкой; снижение качества волокнистого материала в результате многократного воздействия металлических колков, изготовленных из дорогостоящих и дефицитных конструкционных материалов, на хлопок-сырец, т.е. повреждение волокна из семян хлопка, образование свободного волокна.

Кроме того, металлические колки при соударении с твердыми включениями, имеющимися в хлопке-сырце, создают возможность искрообразования и загорания волокнистого материала. Сложность конструкции крепления металлических колков к несущей планке при помощи сварного соединения затрудняет их изготовление, а также восстановление изношенных и поломанных колков. Сборка рабочего органа и замена колков при ремонте требует больших затрат, что приводит к снижению производительности механизма.

Одним из перспективных путей снижения указанных недостатков, повышения эффективности работы хлопковых машин и механизмов является изменение или усовершенствование конструкций колков и изготовление их из новых, наиболее эффективных конструкционных материалов, в том числе из композиционных полимерных материалов, обладающих высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью, отвечающих требованиям, предъявляемым к материалам колков рабочих органов, главными из которых являются технологичность и экономичность используемого материала, эффективное снижение повреждаемости хлопкового волокна и семян, исключение накопления статического электричества, образования намотов волокна на поверхности колков и искры при соуда-

рении с твердыми телами, находящимися в хлопке-сырце.

Исходя из этого, возникает задача по разработке и применению новых композиционных полимерных материалов в рабочих органах хлопковых машин и механизмов.

Объектом исследования выбран промышленный образец полиэтилена высокой плотности. В качестве наполнителя применены следующие порошкообразные минеральные вещества различной химической природы и дисперсности: тальк, каолин, цемент, волластонит; углеродистые — сажа, графит; волокнистые — стекловолокно, хлопковый линт. Выбор этих наполнителей обусловлен их доступностью и значительной дешевизной.

На основании вышесказанного, нами разработаны антифрикционные и антифрикционно-износостойкие полиэтиленовые композиционные материалы на основе полиэтилена высокой плотности, обладающие хорошей механической прочностью, высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения по сравнению со сталью. Они вполне отвечают функциональным требованиям, предъявляемым к материалам колков рабочих органов хлопковых машин и механизмов хлопкоочистительной промышленности и могут быть рекомендованы для их изготовления.

На основании полученных результатов были отлиты детали рабочих органов хлопковых и механизмов с заданными геометрическими параметрами и проведены производственные испытания.

Анализ данных показывает, что применение композиционных полимерных материалов в качестве материалов для разработанной новой конструкции колков рабочих органов хлопковых машин и механизмов, работающих в условиях трения с хлопком-сырцом приводит к повышению производительности машин на 12—16% и снижению потребляемой мощности на 7—18%, поврежденности хлопковых волокон и дробленности семян, а также ликвидации возможного загорания хлопка-сырца и образования намотов волокна на поверхности колков.

1. С.С.Негматов. Научные основы создания высокоэффективных композиционных сорбционных материалов на основе полианилиновых комплексов и технология их получения. Монография. Изд-во. «Фан ва технология». — Ташкент, 2014, 210 с.

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КЛЕЕВ

М.Г. Бабаханова, Г.А. Тухлиев, А.Ш. Насриддинов

Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан; www.gupft.uz

В настоящее время разработка эффективных составов и освоение технологии получения композиционных полимерных клеев на основе органических и неорганических ингредиентов из местного сырья является весьма актуальной проблемой [1, 2].

Разработанная нами безотходная технология получения клеевых композиций включает следующие элементы: а) рецептура клея; б) технологический регламент производства клея из рыночного сырья (описание процедуры его производства); в) установка приготовления готовых клеевых композиций; г) сопровождение специалистом-технологом пуско-наладочных работ производства готового к использованию клея.

Технологический процесс приготовления композиционных полимерных клеев состоит из следующих основных стадий:

- заготовка и хранение компонентов, входящих в композиционные материалы и клея на их основе;
- подготовка компонентов для получения композиций;
- дозировка и подача компонентов композиции в соответствующие агрегаты;
- приготовление композиционных полимерных материалов и клеев на их основе;
- затаривание готового продукта и передача потребителям.

После завершения процесса приготовления клея определяются вязкость и остальные физико-механические показатели, соответствующие ГОСТам, а затем клей отправляют на склад готовой продукции.

Результаты многолетних исследований в Узбекистане авторами статьи показывает, что использование, в частности нанотехнологии, позволяет разработать оптимальных составов и экологически безвредных композиционных полимерных клеев на основе более доступных местного и вторичного сырья для строительства, мебельной промышленности, а также наклейки маркировки алкогольных напитков акцизными марками.

Суть технологии получения композиционных полимерных клеев на основе ингредиентов из местного и вторичного сырья состоит в том, что после обо-

гащения и тонкой очистки органических и неорганических ингредиентов, они модифицируются путем механохимической и теплофизической обработки. В результате чего возможно будет получать композиционных полимерных клеев.

Разрабатываемая технология позволяет получать высококачественных и более дешевых, доступных композиционных полимерных клеев на основе местного и вторичного сырья, обладающих хорошими физико-химическими свойствами, а также устойчивость к высоким и низким температурам, различным уровням влажности для исключения его высыхания и отслоения от продукции.

Главным преимуществом разрабатываемых композиционных полимерных клеев будет обладать низкую стоимость за счет использования вторичного сырья и отходов производств.

Основные характеристики изготавливаемого клея по данной технологии показаны в таблице.

Таблица. Характеристики изготавливаемого клея

Наименование показателей	Ед.изм.	Клей на основе нитронных волокон различных концентраций		
		10%	15%	20%
Начальная вязкость	сП	130	160	220
Продолжительность высыхания при температуре 25 °С	мин	45	35	20
Разрушающее напряжение при сдвиге через сутки после склеивания	кг/см ²	20	25	35
Прочность при отдери	кгс/м	35—45	60—70	95—100
Жизнеспособность при температуре 25±5 °С	сутки	35	30	25
Расход клея	г/м ²	250	200	180

Таким образом, разрабатываемая технология позволяет получать качественные композиционные полимерные клеи на основе местного и вторичного сырья, имеющие высокие адгезионные свойства, обеспечивающие хорошую долговечность.

1. Темкина Р.З. Технология синтетических смол и клеев. М.: Лесная промышленность. — 1995
2. Бердинских И.П. Склеивание древесины. Киев: Госстройиздат УССР. — 1980

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПОЛНИТЕЛЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ЕГО ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА

А.А. Бойко, М.И. Михайлов, К.М. Михайлов

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

Цель работы заключается в оптимизации состава композиционного материала на основе полимеров с абразивным наполнителем по его демпфирующим свойствам.

Материалы и методы. В качестве основы была выбрана эпоксидная смола, а в качестве наполнителя электрокорунд белый. Нагружение производилось в два цикла. Для этого образцы композиционного материала нагружались до небольшого значения нагрузки (2500—3000 Н), при котором не наступало разрушение образцов, затем после 30 минутного перерыва и восстановления образцов, проводилось повторное нагружение образцов до той же нагрузки, что и при первом нагружении.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследований в табл. 1 и 2 По результатам испытаний были построены графики зависимости перемещений образцов от нагрузки (рисунок 6.7 — 6.10).

Таблица 1. Матрица планирования экспериментов

Номера составов	Независимые переменные		
	Эпоксидная смола, мас. ч.	Наполнитель, мас. частей	Зернистость наполнителя
1	11,0	4,0	120
2	11,0	2,0	120
3	9,0	4,0	40
4	11,0	4,0	40
5	9,0	2,0	120
6	9,0	4,0	120
7	11,0	2,0	40
8	9,0	2,0	40
9	10,0	3,0	160
10	11,682	3,0	80
11	10,0	4,682	80
12	10,0	3,0	M40
13	8,318	3,0	80
14	10,0	1,318	80

Таблица 2. Результаты исследования

Номера опытов	Нагрузка, Н	Перемещ. при первом нагружении, мм	Остаточ. перемещ. при разгрузке, мм	Остаточ. перемещение в течении 30 минут, мм
1	2	3	4	5
1	2500	3,4	0,5	1,2
2	3000	3,4	0,6	1,3

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
3	3000	3,8	0,7	1,5
4	3000	3,5	0,6	1,7
5	2500	2,9	0,4	1,2
6	2500	3,5	0,6	1,4
7	3000	3,6	0,9	1,7
8	3000	3,4	0,8	1,6
9	2500	3,1	0,6	1,3
10	3000	3,5	0,7	1,5
11	2500	3,8	0,6	1,4
12	3000	3,6	0,8	1,8
13	3000	4,6	0,7	1,7
14	3000	3,7	0,8	1,6
15	3000	3,5	0,8	1,6
16	3000	3,6	0,7	1,7
17	3000	3,7	0,8	1,6
18	3000	3,5	0,7	1,5
19	3000	3,6	0,8	1,6
20	3000	3,5	0,8	1,6

Полученные результаты позволяют оптимизировать состав материала.

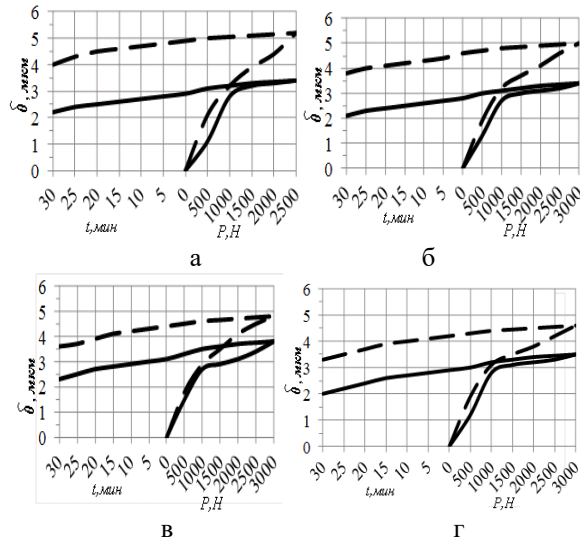


Рис. 1. Типовые графики зависимости перемещений от нагрузки композиционных материалов составов: 1(а), 2(б), 3(в), 4(г)

- Нильсон, Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсон. — М.: Химия, 1978. — 378 с.
- Полимерная фрикционная композиция: пат. 7400 Респ. Беларусь МПК7 C08J5/14 / П.В. Сысоев, З.Я. Шабакаева, М.И. Михайлов; дата публ.: 30.09.2005.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ПОЛИОЛЕФИНОВ И ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Ж.Н. Громыко¹, Н.С. Винидиктова², К.В. Ефимчик¹, О.А. Ермолович¹

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

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

В настоящее время актуальным направлением исследований является разработка новых композитов с целью использования их в качестве изолирующих материалов для нужд промышленного и военного комплекса Республики Беларусь. Области применения таких материалов очень широки от укрывных покрытий до изолирующих конструкций, в том числе, для длительного хранения различных металлоконструкций, металлоизделий и т.п. Закономерности эффективного использования разработанных материалов заключаются в обеспечении изоляции поверхностей от воздействия внешних условий, в том числе защите от коррозии, за счет создания механического барьера, и диффузии активных молекул, содержащихся в составе композита. Использование отходов полимеров и нефтепереработки является эффективным решением экологических и социальных проблем.

Цель исследований — разработка базовых составов композиционных материалов на основе смесей вторичных и первичных полиолефинов, модифицированных отходами нефтепереработки.

Материалы и методы.

В состав разработанного композиционного материала использовали отходы нефтепереработки в концентрации от 5 до 50 мас.% и смеси вторичных и первичных полиолефинов в диапазоне 5-50 мас.%.

Для оценки влияния модификаторов на физико-механические характеристики полимерного композиционного материала исследовали показатели разрушающего напряжения при растяжении, относительного удлинения при разрыве, модуль упругости по ГОСТ 14236 и ПТР. Испытания проводили на разрывной машине РМУ-0,05, при постоянной скорости деформации 50 мм/мин.

Ускоренные коррозионные испытания проводили на базе учебных химических лабораторий УО «БелГУТ» в соответствии с требованиями ГОСТ 9.905; определение показателей коррозии выполняли по ГОСТ 9.908.

Результаты и их обсуждение.

Проведенные исследования показали, что раз-

работанные композиционные материалы характеризуются удовлетворительной прочностью при растяжении, относительным удлинением при разрыве, вязкостью расплава, многократным перегибам и стойкостью к воздействию атмосферных факторов.

Показано, что в результате протекающих физико-химических взаимодействий в разработанных смесях формируется однородная, гомогенная структура во всем объеме, характеризующаяся высокой плотностью упаковки молекул, обусловленная протекаем межмолекулярных взаимодействий между функциональными группами компонентов смесей.

Проведена оптимизация концентрационных составов изолирующих композиционных материалов по комплексу технических критериев с учетом области применения композита и особенностей воздействия атмосферных факторов. Установлены зависимости физико-механических характеристик материала от концентрации базовой смеси полиолефинов и модификатора, технологии получения и температурных режимов его переработки.

Анализ кривых деформационно-прочностных характеристик и показателя текучести расплава показал возможность широкого варьирования эксплуатационных свойств материалов и расширение области их применения.

Выводы.

Таким образом, разработанные композиционные материалы на основе смесей вторичных и первичных полиолефинов, модифицированных отходами нефтепереработки, могут эффективно использоваться в качестве изолирующих материалов, формируемых методами экструзии и литья под давлением.

3. Громыко Ж.Н., Неверов А.С., Ермолович О.А. Физико-механические характеристики композиционного материала на основе полиэтилена, модифицированного природными углеводородами // Полимерные материалы и технологии. — 2019, Т.5, № 79—87.

4. Kudina, H.F. Composite Materials Intended to Repair Mechanical Defects in Pipelines / H.F. Kudina, S.N. Bukharov and V.P. Sergienko // In: Advances in Engineering research. Vol. 26 / Ed. by V.M. Petrova. — New York: Nova Science Publishers, Inc., 2019. — Ch. 3. — Pp. 107—172.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.С. Винидиктова, О.В. Конакова, В.М. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
konakovaolga08@gmail.ru

Введение. Широкое применение полимеров в различных областях народного хозяйства обусловило значительный рост количества полимерных отходов. По различным источникам, не менее 15% всех производимых полимеров используется для изготовления тары и упаковки. Серьезным экологическим аспектом использования полимерных изделий является проблема их утилизации [1].

Цель данного исследования — оценить способность полимерных композитов, используемых для упаковочных материалов, к биоразложению.

Материалы и методы. Исследованы упаковочные материалы различных производителей, которые представлены на рынке в сфере торговли в качестве элементов упаковки и посуды с указанием на их способность к практически полному биоразрушению в течение 1—2 лет. Деформационно-прочностные характеристики оценивали по ГОСТ 14236 на стенде Instron. Для изучения химического состава регистрировали ИК-спектры в интервале частот 400–4000 см⁻¹ на ИК-Фурье-спектрофотометре NICOLET 5700. Оценку биодеструкции проводили по ГОСТ 9.060, помещая образцы в почву. Скорость биодеструкции оценивали по изменению внешнего вида, массы, физико-механических, молекулярных и структурных характеристик образцов [2].

Результаты и их обсуждение. Анализ данных ИК-спектроскопии показал, что основными компонентами изучаемых композитов являются: полиэтилен ПЭНД 277-73 (образцы 1—4); полиэтилентерефталат ПЭТФ (5); смесь полипропилена ПП и модифицированного крахмала (6). Отмечено наличие некоторых количеств целлюлозы и полимеров молочной кислоты, которые, по-видимому, играют роль естественных биоразрушаемых компонентов и/или входят в состав катализаторов биodeградации. Можно предположить, что данные катализаторы являются комплексными соединениями переходных металлов и их оксидов с макромолекулами полисахаридов, благодаря чему должны проявлять комплексную физико-химическую активность. Процесс биоразрушения композитов должен начинаться именно с этих активных центров, далее продолжаясь по цепочке с участием окисленных функциональных групп синтетических полимеров.

Проанализирована динамика изменений, происходящих в образцах в ходе имитации компостирования в течение 1 месяца (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Динамика изменений, происходящих в образцах в ходе испытаний (декларируемый состав)

Образцы	$\Delta m, \%$	Цвет	$\Delta \sigma, \%$
1 (ПЭ 100% разлагаемый)	+0,8	Изменения не значительны, пятна до 2 мм	от 0 до 20% в зависимости от условий испытаний
2 (ПЭ биоразлагаемый)	-1,2	Изменения не значительны, пятна до 2 мм	
3 (ПЭ+DCP-128)	-0,5	Нет изменений	
4 (ПЭ+d2w)	-1,7	Нет изменений	
5 (MATER BI)	-10,5	Потемнение по всему образцу	
6 (ПП + крахмал)	-20	Четко видны колонии микроорганизмов (рис.1)	

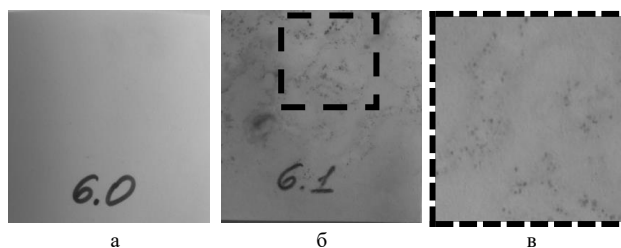


Рис. 1. Снимок образца биоразрушаемого материала для одноразовой посуды: а — исходный, б, в — после компостирования

Более полное представление о динамике биоразрушения и о подтверждении предположения о его механизме можно будет получить, продолжив изучение свойств композитов в более длительном промежутке времени и дополнив его результатами микробиологических исследований материалов и среды.

Заключение. Сделан вывод о целесообразности поиска оптимальных сочетаний в биоразрушаемых композициях синтетических, природных полимеров и комплексных инициаторов биodeградации. Предпочтительно, чтобы эти инициаторы содержали функционально активные агенты, способные активизировать в изучаемых системах процессы окисления, что позволит сократить сроки биodeградации композитов и утилизации полимерных изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма ПМТ 6.52.

1. Крутько Э.Т. Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие для студентов / Э.Т. Крутько, Н.Р. Прокопчук, А.И. Глоба. — Минск: БГТУ, 2014. — 105 с.
2. Методы оценки биоразлагаемых полимерных материалов / О.А. Ермолович (и др.) // Биотехнология. — 2005. — С. 47—54.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ НАПОЛНЕННОГО ШУНГИТОМ ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТИОКСИДАНТОВ АМИННОГО И ФЕНОЛЬНОГО ТИПОВ

Е.В. Воробьева¹, Е.Н. Волнянко²

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

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

Интерес к использованию шунгита в качестве наполнителя для полимерных композитов вызван его природным происхождением, низкой ценой, особенностями химического строения и структуры. Он состоит из двух основных компонентов, которые по химической природе близки к наиболее часто используемому наполнителю: техническому углероду и оксиду кремния. Показано, что частицы этого наполнителя обладают нуклеирующей активностью, введение его в полиолефины приводит к увеличению скорости и степени кристаллизации полимера. Установлено, что введение шунгита улучшает механические (отмечен рост модуля упругости) и адгезионные свойства, изменяет электрические и теплопроводные характеристики пленок наполненного полимера [1]. Известно, что любой наполнитель оказывает влияние (антагонистическое, синергическое или аддитивное) на термоокислительные свойства полимера. Причем это влияние особенно ярко проявляется при использовании в конечном полимерном материале антиоксидантов.

Цель работы — исследование окислительной стойкости полиэтилена, наполненного шунгитом, при введении антиоксидантов аминного и фенольного типов.

Материалы и методы. В работе использовали порошкообразный нестабилизированный полиэтилен низкой плотности (ПЭНД, ГОСТ 1866, марка 005), антиоксидант фенольного типа ирганокс 1010 и антиоксидант аминного типа неозон Д. В качестве наполнителя применяли ультрадисперсный порошок шунгита (Кольское месторождение, средний размер частиц ~100 нм). Для исключения влияния на стабилизацию полимерных композитов возможных органических примесей, содержащихся в природном наполнителе, шунгит предварительно термообработывали (0,75 ч при температуре 150—200 °С; 1,5 ч при температуре 600—650 °С). Механические смеси полимера и модификаторов перемешивали в полярном растворителе. Исследовали пленочные образцы полимерных композитов, изготовленные методом термического прессования. Термоиспытания проводили при температуре 150 °С. Степень окисления композитов оценивали методом ИК-спектроскопии (ИК-Фурье-спектрофотометр Vertex 70, BRUKER, Германия) по полосе поглощения 1720 см⁻¹ в ИК-спектрах образцов. Термоокислительную стойкость оценивали по продолжительности индукционного периода окисления (ИПО) образцов. Окончанием ИПО считали время достижения оптической плотности полосы поглощения 1720 см⁻¹ значений

0,03—0,04 ед.

Результаты и их обсуждение. При использовании шунгита без термообработки получили неоднозначные результаты по изменению термоокислительных свойств образцов, что, вероятно, обусловлено действием органических примесей. Результаты испытаний пленочных образцов, содержащих термообработанный шунгит и антиоксиданты приведены в таблице.

Таблица. Продолжительность ИПО (ч) пленочных образцов толщиной 100 мкм при термоокислении (150 °С)

Шунгит, мас. %	Антиоксидант		
	-	0,2 мас. % неозон Д	0,1 мас. % ирганокс 1010
0	1,5	8	31
1	1,5	8	2
3	1,5	8	2
5	2	8	2
7	2	8	2

Представленные данные свидетельствуют, что введение шунгита (в количестве 1—7 мас. %) в нестабилизированный полиэтилен существенно не влияет на термоокислительную стойкость полиэтилена — ИПО всех образцов составляет 1,5—2 ч. Введение шунгита также не изменяет термоокислительную стойкость образцов, содержащих аминный антиоксидант неозон Д: образцы без шунгита и образцы, содержащие этот наполнитель, имеют одинаковую продолжительность ИПО. Однако в композициях, содержащих антиоксидант фенольного типа ирганокс 1010, введение шунгита приводит к резкому снижению термоокислительной стойкости материала. Как видно из данных таблицы, образцы, не содержащие шунгит, а только ирганокс 1010, имеют ИПО продолжительностью в 31 ч. Все образцы, содержащие такое же количество антиоксиданта (0,1 мас. %) и 1—7 мас. % шунгита характеризуются продолжительностью ИПО всего в 2 ч.

Вывод. Термоокислительная стойкость полимерного композита, наполненного шунгитом, зависит от природы антиоксиданта. Для успешной стабилизации шунгит-наполненных композитов с полиэтиленовой матрицей рекомендовано использование антиоксидантов аминного типа.

- Горбаткина Ю. А. и др. Адгезионные свойства композиций полипропилена с обработанным шунгитовым наполнителем // Высокомолекулярные соединения. Серия А. — 2005 (47), № 10, 1812—1821

КОРОБЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЭВП, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ЭКСТРУЗИОННО-ПРЕССОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.А. Герасименко

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

Введение. Коробление изделий из термопластов является результатом неравномерной усадки. В случае ненаполненных термопластов, формуемых при охлаждении расплава в технологической оснастке, неравномерная усадка обуславливается разностью температур различных частей изделия. Если одна поверхность технологической оснастки будет иметь повышенную температуру, то более горячая часть изделия охлаждается медленнее. В случае переработки частично кристаллических термопластов в элементах изделия, контактирующих с более горячей поверхностью оформляющих элементов, кристалличность материала увеличивается, что влечет за собой повышение усадки в этой части. Различия в размерах элементов изделия обуславливают возникновение в них изгибающего напряжения, приводящего к образованию вогнутости со стороны поверхности, испытывающей большую усадку [1].

Цель работы — анализ коробления композитов ПЭВП с добавками вспенивателя, а также наполненного мелом при их переработке по экструзионно-прессовой технологии [2].

Материалы и методы. В экспериментах использовали ПЭВП марки 277-73 производства ООО «Ставролен». В качестве модификатора применяли вспениватель марки ADDITIVE 50200 производства ф. «Сготех» (Бразилия).

Композиты получали методом реакционной экструзии при использовании двухшнекового реактора-смесителя с односторонним вращением шнеков ($D = 35$ мм, $L/D = 40$), 10 независимых секций обогрева материального цилиндра.

Для изучения усадочных явлений, коробления, и получения образцов с целью определения показателей механических свойств использовали универсальную пресс-форму. Типы и характерные размеры получаемых образцов показаны на рис. 1 [2].

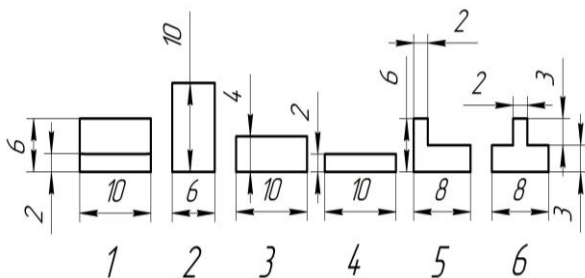


Рис. 1. Тип образца (1-6), форма и характерные размеры сечения

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведены значения величины изгиба образцов после прессования исходного ПЭВП 277, а также с добав-

лением вспенивателя и мела, в зависимости от формы, размеров и конфигурации сечения образцов.

На рис. 3 приведены значения изгиба тех же образцов после термообработки их при температуре 100 °С в течении 5 часов.

Из графиков видно, что на величину изгиба образцов значительное влияние оказывает их толщина, геометрическая форма и наличие ребер жесткости. После термической обработки величина изгиба на всех образцах уменьшается, что объясняется релаксацией внутренних напряжений.

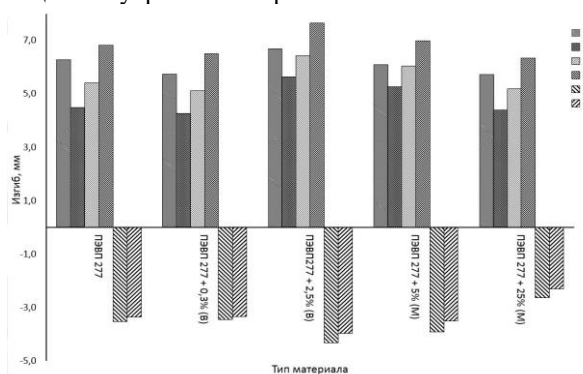


Рис. 2. Коробление ПЭВП 277 вспененного (В) и наполненного мелом (М) в зависимости от типа образца

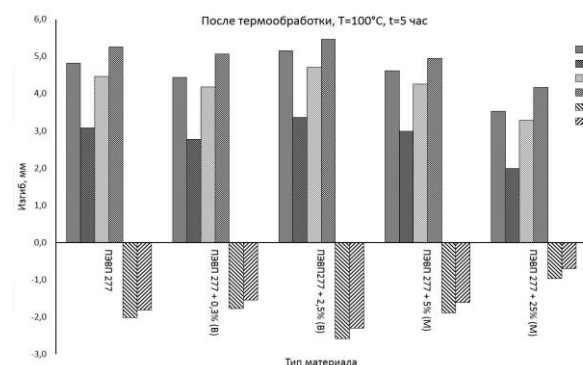


Рис. 3. Коробление ПЭВП 277 вспененного (В) и наполненного мелом (М) после термообработки в зависимости от типа образца

Наименьшим короблением характеризуется композит, содержащий 25 мас.% мела.

1. Фишер Дж. М. Усадка и коробление отливок из термопласта. — СПб.: Профессия. — 2009.
2. Герасименко С.А., Песецкий С.С. О формуемости смесей ПП/ПЭ при экструзионно-прессовой переработке // Материалы. Технологии. Инструмент. — 2011 (16), № 3, 71—79.

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДОВ,
НАПОЛНЕННЫХ ЛЬНОКОСТРОЙ**О.В. Давыдова¹, Н.Е. Дробышевская¹, Е.Н. Подденежный¹, А.А. Бойко¹, В.М. Шаповалов²¹Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь; olga_davidova-uretskaya@mail.ru²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Цель: Разработка новых биоразлагаемых композитов на основе полиамидов, наполненных молодой льнокострой.

Введение.

Наполнение полимеров лигноцеллюлозными биоразлагаемыми материалами природного происхождения, такими как древесная мука, солома, лузга злаковых культур удешевляет полимерные композиции и позволяет значительно уменьшить экологическую нагрузку на природу после их использования, что особенно важно для упаковочных материалов и одноразовой посуды [1]. В последнее время появилось много статей и патентов, в которых описаны составы и способы производства биоразлагаемых продуктов в виде композитов с использованием полиолефинов и органических наполнителей — крахмала, целлюлозы, рисовой и гречишной лузги и т.п. [2, 3]. Недостатками предлагаемых композиций являются: малое водопоглощение за счет большой доли гидрофобного полимера (полиэтилена или полипропилена), и отсюда — увеличенный период биоразложения. Такие композиты относятся к классу медленно биоразлагаемых, а в результате их распада образуются фрагменты — микропластик, который может попадать в почву, воду и вызывать нежелательные последствия в виде повреждений растений и животных.

Экспериментальная часть.

В НИЛ технической керамики и наноматериалов ГГТУ имени П.О. Сухого разрабатываются новые композиционные биоматериалы с матрицами на основе полиамидов с уменьшенным периодом биоразложения. Одним из перспективных направлений создания таких композиций является использование отходов льнопроизводства, в частности — льнокостры, запасы которой в Беларуси практически неограниченны и постоянно возобновляются. Льнокостра — это одревесневшие части льняных стеблей. Костра имеет следующий химический состав, мас. %: целлюлоза — 45—58, лигнин — 21—29, гемицеллюлоза — 9,1, экстрактивные вещества — 9,9, пектиновые вещества — 2,0, зола — 1,5, вода — 8% [4]. Благодаря использованию смесей полиамидов и природного наполнителя обеспечивается повышенная термостойкость получаемых изделий, а также уменьшенный период биологического разрушения.

Полиамид ПА11 получают из возобновляемого натурального источника, которым является касторовое масло, добываемое из семян клещевины (*Ricinus Communis*), допущен для использования в контакте с пищевыми продуктами. Полиамид ПА6 пищевой квалификации производится в РБ в промышленном масштабе, является доступным и относительно недорогим сырьем. Особенностью полиамидов является довольно большой процент водопоглощения при комнатной температуре, составляющий 1,2—3,2 мас. % за 24 часа в отличие от полиэтилена, (для полиэтилена низкой плотности процент водопоглощения составляет 0,02 мас. %). Для повышения скорости биоразложения и разрыхления структуры полиамидов в композицию вводится порошкообразный поливиниловый спирт (ПВС). Он относится к синтетическим биоразлагаемым веществам, хорошо набухает в воде, что создает дополнительный источник водопоглощения композиционного материала. Известно, что поливиниловый спирт в количестве 5—10 мас. % смешивается при плавлении с полиамидами на молекулярном уровне за счет взаимодействия гидроксильных групп ПВС с амидными группами полиамида [5], что формирует гетерофазную матрицу — основу композиционного материала.

Заключение.

Разработанные биоразлагаемые композиции могут перерабатываться на традиционном для пластмасс оборудовании (экструдер, термопластавтомат). Изделия из них обладают температурой размягчения не менее 110 °С и биологической разрушаемостью в компосте после срока эксплуатации в течение 8—12 месяцев.

1. А.Е. Шкуро и др. Наполнители аграрного происхождения для древесно-полимерных композитов / Вестник Казанского технологического университета. — 2014 (17), № 21, 160—163
2. Патент РФ № 2582498, МПКС08L23/6, опубл. 28.04.2010.
3. Патент РФ № 2363711, МПКС08L23/6, опубл. 10.08.2009.
4. И.И. Карпунин и др. Химия льна и перспективные технологии его углубленной переработки. — Минск: Беларус. Навука. — 2013
5. B. Ramaraj, P. Poomalai. Development of Potentially Biodegradable Polyamide-6 and Polyvinyl Alcohol Blends: Physico-Mechanical Properties, Thermal Properties, and Soil Test // Journal of Applied Polymer Science. — 2005 (98), 2339—2346

ВЛИЯНИЕ ДЕКОРИРОВАНИЯ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НАНОЧАСТИЦАМИ TiC НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПРИ ОБРАБОТКЕ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

А.В. Аборкин, А.И. Елкин, К.С. Хорьков, Д.В. Бокарёв

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия; aborkin@vlsu.ru

Гибридные материалы на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), поверхность которых декорирована наночастицами или покрытиями карбидов металлов, представляют новый класс функциональных материалов и имеют большую перспективу в качестве нанодисперсных наполнителей металлов и сплавов [1–4]. Одним из перспективных методов синтеза гибридных материалов являются химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений (МОСVD-метод). В данном методе металлосодержащие наночастицы осаждаются на поверхность МУНТ при пиролизе паров металлоорганических соединений в результате химических реакций на поверхности МУНТ [5]. Механический синтез нанокомпозиционных порошков проводили в планетарной мельнице Активатор-4М. Были синтезированы композиционные порошки на основе алюминиевого сплава АМг2, упрочненные добавками МУНТ и TiC/МУНТ. Изучение синтезированных порошков на сканирующем электронном микроскопе показывает, что частицы порошка имеют неправильную форму, характерную для механического синтеза пластичных материалов. Оценку повреждения наполнителя при обработке в планетарной мельнице проводили с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света на NTEGRA Spectra. Для этого композиционные порошки уплотняли без подогрева до получения механически прочных брикетов.

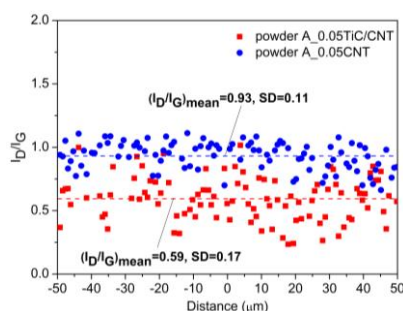


Рис. 1. Результаты микрокартографирования порошков, наполненных МУНТ и TiC/МУНТ

Регистрацию спектров комбинационного рассеяния производили от точек на поверхности, образующих линию длиной 100 мкм. Для этого использовали методику линейного микрокартографирования с шагом 0,78 мкм. Результаты микрокартографирования образцов, наполненных МУНТ и TiC/МУНТ приведены, на рис. 1. Сравнительный

анализ данных спектроскопии комбинационного рассеяния света показывает, что для композиционных порошков, наполненных МУНТ, характерно большее повреждение наполнителя, чем при использовании в качестве наполнителя TiC/МУНТ. Среднее отношение интенсивности D линии к интенсивности G линии (I_D/I_G) составили 0.93 и 0.59 для порошков наполненных МУНТ и TiC/МУНТ соответственно. При этом до размола данный показатель составлял 0.25 и 0.35 для МУНТ и TiC/МУНТ соответственно. Полученные данные свидетельствуют о том, что наличие наночастиц TiC на поверхности МУНТ снижают повреждаемость МУНТ при высокоэнергетическом воздействии мелющих тел в процессе обработки. Кроме того, в ходе обработки не образуется фаза Al_4C_3 . Консолидация синтезированных порошков проведена методом спекания под давлением при температуре 450 °C. Изучение консолидированных образцов показывает, что в ходе консолидации наполнитель не претерпевает повреждений, так как соотношение I_D/I_G изменяется незначительно не более чем на 0.3.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 18-79-10227).

- Аборкин А.В., Хорьков К.С., Обьедков А.М., Кремлев К.В., Изобелло А.Ю., Волочко А.Т., Алымов М.И. Эволюция многостенных углеродных нанотрубок и гибридных наноструктур на их основе в процессе получения алюмоматричных композиционных материалов // Письма ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 2. С. 22–25.
- Кремлев К.В., Обьедков А.М., Семенов Н.М., Каверин Б.С., Кетков С.Ю., Вилков И.В., Андреев П.В., Гусев С.А. Аборкин А.В. Синтез гибридных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок, декорированных нанополыми WC1-x различной морфологии // Письма ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 7. С. 41–44.
- Кремлев К.В., Обьедков А.М., Семенов Н.М., Каверин Б.С., Кетков С.Ю., Гусев С.А., Юнин П.А., Елкин А.И., Аборкин А.В. Газофазный синтез нового функционального гибридного материала на основе многостенных углеродных нанотрубок, декорированных ограниченными нанокристаллами алюминия // Письма ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 19. С. 24–31.
- Saba F., Sajjadi S.A., Haddad-Sabzevar M., Zhang F. Formation mechanism of nano titanium carbide on multi-walled carbon nanotube and influence of the nanocarbons on the loadbearing contribution of the nanotubes inner-walls in aluminummatrix composites // Carbon. 2017. Vol. 115. pp. 720–729.
- Aborkin A.V., Kremlev K.V., Obiedkov A.M., Kaverin B.S., Semenov N.M., Zabrodina G.S. Synthesis and characterization of new hybrid material based on MWCNTs decorated with titanium carbide nanocoatings with different morphology as reinforcing components of alloys // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1164. 012020.

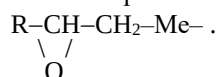
РАЗРАБОТКА МУЛЬТИГИБРИДНЫХ СИЛИКАТОРГАНИЧЕСКИХ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВИ.И. Злотников¹, В.М. Шаповалов²¹Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь; z_ai@tut.by²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Одним из перспективных направлений в создании новых поколений полимерных композиционных материалов является синтез наполнителей и модификаторов с уникальными свойствами. В частности, большое внимание уделяется разработке мультигибридных наполнителей, которые представляют собой систему, состоящую из полидисперсных частиц различной природы. Такие наполнители обладают высоким физико-химическим сродством к полимерной матрице и в то же время выполняют функцию жесткого абразивостойкого минерального наполнителя.

Цель работы — разработка мультигибридного силикаторганического наполнителя и исследование его влияния на физико-механические свойства полиамида.

Материалы и методы. При синтезе наполнителя водорастворимый алифатический эпоксидный олигомер марки ДЭГ-1 вводили в водный раствор силиката натрия в количестве 10 мас.%. Полученный бинарный органно-неорганический раствор коагулировали водным раствором солей поливалентных металлов: хлорид железа (FeCl_3), хлорид меди (CuCl_2), хлорид алюминия (AlCl_3). Использование солей одной кислоты позволяет более достоверно проследить влияние природы металла на свойства готового наполнителя. После завершения процесса золь-гель перехода, осажденный продукт промывали, сушили путем нагрева токами СВЧ и диспергировали.

Результаты и их обсуждение. Исследования полученного продукта показали, что его можно рассматривать как органносиликатную микрогетерогенную систему, в которой кластеры аморфного диоксида кремния (SiO_2) различного размера внедрены в более крупные частицы эпоксидного олигомера. При этом ионы поливалентных металлов оказываются имплантированными как в структуру SiO_2 с образованием соответствующих металлосиликатных соединений общей формулы $\text{MeO} \cdot n\text{SiO}_2$, так и в макромолекулы эпоксидного олигомера с образованием металлоорганических соединений типа:



Последнее приводит к тому, что в ИК-спектрах полученного наполнителя наблюдается появление интенсивных полос поглощения в области $1560\text{—}1640\text{ см}^{-1}$, характерных для металлосодержащих соединений типа солей карбоновых кислот и комплексов металлов.

Тонкодисперсные металлоэпоксисиликатные

наполнители (МЭСН) с размером частиц не более 40 мкм вводили в полиамид 6 (ПА6). Образцы для исследования изготавливали экструзией. На рис. 1 приведена зависимость разрушающего напряжения при растяжении ПА6 от типа и содержания МЭСН.

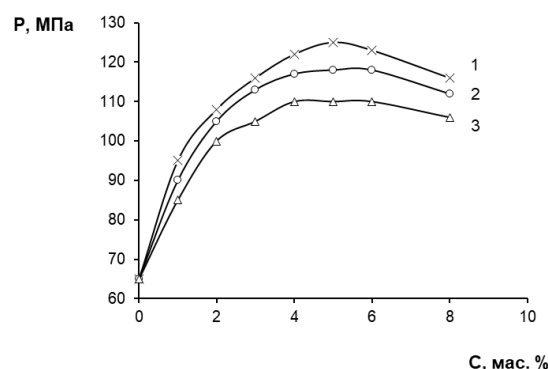


Рис. 1. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении ПА6 от содержания МЭСН с использованием модифицирующих ионов 1 — железа, 2 — меди, 3 — алюминия

Как следует из приведенных данных МЭСН модифицированный ионами железа способствует наибольшему увеличению механической прочности ПА6. Влияние данного МЭСН на свойства ПА 6 в сравнении со стандартным диоксидом кремния иллюстрируют данные приведенные в табл.1.

Таблица 1. Влияние МЭСН на свойства ПА6

Характеристика	ПА6	ПА6 + 5 мас.% МЭСН	ПА6 + 5 мас.% SiO_2
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	65	118	92
Водопоглощение за 48 ч, %	4,2	1,8	3,5
Температура начала плавления, °С	218	228	225
Температура начала потери массы, °С	359	378	364

Как следует из представленных данных введение разработанного наполнителя в полимерную матрицу позволяет увеличивать механическую прочность, термостойкость и значительно снижать водопоглощение получаемого композиционного материала. Это позволяет расширять эксплуатационные возможности ПА6 и применять его для разработки деталей механизмов, работающих в условиях повышенных температур, механических нагрузок и влажности, в частности при воздействии атмосферных факторов.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗОВ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

М. Каршиев², А.М. Эминов¹

¹Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиет» (Наука и прогресс),

²Ташкентский химико-технологический институт (ТХТИ)

Одним из основных преимуществ порошковой металлургии является возможность изготовления пористых порошковых материалов (ППМ). Наличие системы взаимосвязанных пор обеспечивают ППМ такими свойствами, как проницаемость для жидкости и газов, способность к капиллярному транспорту жидкости и ее удержанию в порах. Эти свойства, а также высокая прочность и пластичность, устойчивость к тепловым ударам, коррозионная стойкость и жаропрочность являются основой для успешного применения ППМ во многих областях промышленности: машиностроении, материаловедение, сельском хозяйстве, приборостроении, медицине, коммунальном хозяйстве и т. д. [1]. Они используются как фильтрующие элементы в установках для очистки суспензий, жидкостей, масел, воздуха и газов от инородных примесей, дозирования и равномерного распределения жидкостей или газов, в качестве подложек для транспортирования сыпучих сред, смешивания жидкостей и газов, звукопоглощения, в качестве элементов теплонагруженных конструкций, капиллярно-пористых элементов теплопередающих устройств, катализаторов, виброгасителей и т.д. [2]. Теоретические исследования показали, что наиболее полно всем требованиям удовлетворяют ППМ с анизотропной структурой в направлении фильтрации. Теоретически установлено, что ППМ с анизотропной структурой позволяют повысить ресурс работы фильтра более чем в 5 раз по сравнению с ППМ с изотропной структурой. [3].

Нами были проведен в ГУП «Фан ва тараккиет» (Наука и прогресс) и ТХТИ теоритическое и экспериментальное исследован способ многократного осаждения частиц порошков различных гранулометрических и химических составов в предварительно спеченную заготовку из газопылевого потока

воздуха при помощи вибрации и разработан на этой основе нового технологического процесса регулирования порораспределения ППМ, обеспечивающего получение изделий с более высокими эксплуатационными свойствами, а именно с высокой механической прочностью и проницаемостью при заданном размере пор. Технология получения фильтрующих элементов типа «стакан» следующая: из порошка бронзы марки БрОФ-10-1 с размером частиц $(-1000+800)$ мкм методом спекания свободно насыпанного порошка в форму изготавливали заготовку типа «стакан». Спекание производили $800...810$ °С в среде дислоцированного аммиака в течение 1 часа. После спекания заготовку засыпали осаждаемый бронзовый порошок с размером частиц, составляющим $0,2\pm 0,25$ размера частиц заготовки, т.е. с размером частиц $(-250 + 200)$ мкм, и пропускали газ со скоростью 1 м/с, затем подключили вибратор и прикладывали к колебаниям вибрации частотой $V = 450...500$ Гц, амплитудой $a = 19...21$ м/с² [4]. Таким образом, новый способ по сравнению с известным способом (спекание свободно насыпанного порошка в форму) фильтрующие изделия имеют проницаемость 2 раза, а механическую прочность в 3 раза выше при заданном размере пор. Также увеличивается производительность процесса и ресурс работы элемента в три раза.

1. Белов С.И. Пористые проницаемые материалы. М.: Наука 1987. 320 с.
2. Митина Б.С. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М. 1987. 280 с.
3. Капцевич В.М., Сорокина А.Н. Режимы течения газа в спеченной пористой бронзе // Порошковая металлургия. — Минск: Выш. шк., 2002. — вып. 6. — С. 46—49.
4. Либенсон Г.А., Панов В.С. Оборудование цехов порошковая металлургии. — М.: Металлургия, 2003. — 264 С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СШИТОГО ПЭ МЕТОДОМ РАЗДИРА РАЗДИРАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.С. Васильева, В.В. Коврига

ООО «Группа Полимертепло», Москва, Россия

Для материалов внутренней рабочей трубы теплопроводов важнейшее значение имеет температурная зависимость прочности. Ранее было предложено, изучать температурную зависимость прочности при раздире в материалах типа ПЭ, используя технику раздира материала раздирающим элементом. Результаты были доложены на научно-практических конференциях Тепло России и опубликованы [1],[3]

Методика определения сопротивления раздиру раздирающим элементом состоит в раздире образца материала вдоль главной оси [2]. Постепенный подъём температур позволяет в одном опыте получить температурную зависимость сопротивления раздиру. Это определяет возможность эффективного применения метода. Кривые зависимости сопротивления раздира от температуры представлены на рис.1, а и 1, б

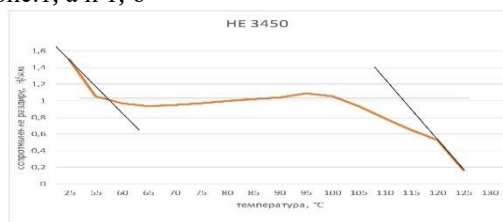


Рис. 1а. Кривая зависимости сопротивления раздира от температуры

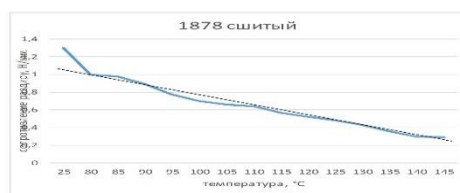


Рис. 1б. Кривая зависимости сопротивления раздира от температуры

Как видно из представленных данных, темп снижения прочности с температурой, для различных видов ПЭ, существенно различается. Для того, чтобы получить сравнимые данные по темпу падения прочности с температурой кривые сопротивления раздиру были пронормированы по величине сопротивления раздиру при 80 градусах. Исследование показало, что в диапазоне температур от комнатной

до температуры плавления, существует 4 характерных области изменения прочности. Определения прочности при раздире было выполнено на материалах фирмы Borealis: HE 3450, 3490LS,LSH, 3494 LSH, предназначенные для производства толсто-стенных полиэтиленовых труб и продукты полиэтилена марки 1878, предназначенные для производства сшитого полиэтилена, которые исследованы в двух вариантах-до и после сшивания, 3492 LSH.

Результаты определения темпов падения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты определения темпов падения прочности

материал	1ое падение	зона ориентационного упрочнения	зона падения после ориентационного упрочнения	падение в области предплавления
HE3494 LSH	25-65, 0,3%**C ⁻¹	80-92 7,9%		92-115, 3%**C ⁻¹
HE 3450	25-70, 0,6%**C ⁻¹	80-104 15%	104-121 2,9%**C ⁻¹	117-125 7,5%**C ⁻¹
HE3492 LSH	80-93, 0,4%**C ⁻¹	93-111 2,8%**C ⁻¹	111-125 2,5%**C ⁻¹	125-135, 6%**C ⁻¹
HE3490 LS	25-85, 0,4%**C ⁻¹	85-104 2,6%**C ⁻¹	104-132 1%**C ⁻¹	132-140, 5%**C ⁻¹
HE3490 LSH	25-85, 0,4%**C ⁻¹	85-105 7,7%	105-118 2,3%**C ⁻¹	118-125, 2,8%**C ⁻¹
HE1878 несшитый	25-80, 0,6%**C ⁻¹		85-109, 1,1%**C ⁻¹	109-145, 1,9%**C ⁻¹
HE1878 сшит				80-145, 1,15%**C ⁻¹

Установленный ранее факт отсутствия падения прочности при раздире в диапазоне температур от 80-115 градусов, характерен для довольно большой группы материалов, а именно HE 3450, HE 3492 LSH, HE 3490 LSH, HE 3490 LS, HE 1878 несшитый

Приведенные результаты показывают существенное влияние процессов сшивания ПЭ на характер изменения темпа падения прочности, как это видно по виду кривой, на рис. 1, б.

1. Коврига В.В., Пендик С.С., Пятин И.Н., Зайчикова И.В. Исследование температурных зависимостей прочности полиолефинов, используемых для изготовления рабочих труб теплоснабжения. Журнал «Пластические массы» №5 Москва, 2013г.
2. Коврига В.В., Круглова Е.А., Кацевман М.Л., Зайчикова И.В. СТО 73011750-009-2012.Пластмассы. Метод определения сопротивления раздиру армирующим элементом при различных температурах на раздвоенных образцах
3. Заявка на патент № 2019110962 Способ определения сопротивления раздиру раздирающим элементом изделия из полимера Коврига В.В., Васильева А.С., Орешенкова Т.Ф., Маликов А.И.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ РЕАКТОПЛАСТОВ В КАЧЕСТВЕ ПОКРЫТИЙ

Е.Ф. Кудина^{1,2}

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,
kudina_mpri@tut.by

В настоящее время разработано большое количество композиционных покрытий для металлических поверхностей [1, 2], отличающихся по составу, свойствам, технологии нанесения и стоимости. Однако, эксплуатационные характеристики многих используемых покрытий и технологий их получения не удовлетворяют современным требованиям [2, 3]. Не все покрытия выдерживают воздействия перепада температур, агрессивных сред и др. Поэтому, несмотря на то что мировой уровень развития дает надежные и экономически оправданные составы материалов и системы покрытий, до сих пор в области материаловедения защитных покрытий остается достаточно много нерешенных вопросов.

В настоящее время для применения в качестве связующих защитных покрытий отверждаемых без дополнительного нагрева наиболее эффективны эпоксидные смолы (ЭС). Широкое их применение обусловлено большим ассортиментом, возможностью варьирования природой отвердителя и условиями процесса отверждения, высокими показателями прочности и адгезии создаваемых композитов. Тем не менее, большинство материалов на основе ЭС наряду с высокими механическими свойствами отличаются хрупкостью [1, 2]. Эффективность же применения материала в конструкции определяется оптимальным соотношением между прочностью и пластичностью. Повысить ударную прочность отвержденных ЭС можно путем введения функционализирующих реагентов (каучуков, фенолоформальдегидных олигомеров, алкоксисиланов и др.). С другой стороны, эффективным воздействием на структурные параметры исходных и функционализированных ЭС является введение минеральных наполнителей [2]. В результате сочетания в объеме разнородных компонентов — полимерной матрицы и наполнителя — улучшаются функциональные свойства материала, определяемые активностью наполнителя и составом комбинированной матрицы.

Цель работы — получить системы защитных покрытий для стальных поверхностей на основе функционализированной эпоксидиановой смолы ЭД-20 и силикатсодержащих наполнителей.

Методика исследований. Объектом исследования являлись композиты на основе ЭС. Для функционализации ЭС применяли каучук синтетический бутадиен-нитрильный, полиэфирную и фенолоформальдегидную смолы, ϵ -капролактam, поливинилбутираль. В качестве высокодисперсных силикатсодержащих наполнителей использовали серпентинит, каолин, бентонит, монтмориллонит, ценосферы и

синтезированные металлосодержащие гибридные наполнители.

Результаты исследований и их обсуждение. Получены комбинированные матрицы на основе функционализированной ЭС, а также наполненные силикатсодержащими продуктами композиты. Рассмотрено влияние функционализирующего реагента на свойства комбинированной матрицы. Проведен сравнительный анализ влияния состава силикатсодержащего наполнителя и концентрационных соотношений наполнитель/связующее на физико-механические свойства покрытия. Показано влияние типа обработки стальной поверхности на адгезионную прочность разработанных покрытий к стали.

Установлено, что улучшение физико-механических свойств композиционных покрытий на основе ЭС достигается при использовании технологических приемов: 1 — функционализация связующего с получением комбинированной матрицы, 2 — введение силикатсодержащих наполнителей. Наибольшее повышение адгезионной прочности покрытие/сталь отмечено после пескоструйной обработки и последующего нанесения на поверхность металла активного конверсионного слоя на основе силоксанов.

Для проведения функционализации ЭС наиболее эффективно применение олигомера фенолоформальдегидной смолы в сочетании с каучуком, позволяющих снизить хрупкость исходного реактопласта, улучшить физико-механические свойства, качество покрытия и адгезионную прочность со сталью. Применение в составе покрытия на основе ЭС или комбинированных связующих силикатсодержащих наполнителей приводит как к повышению адгезии к поверхности стали, так и улучшению эксплуатационных характеристик: упрочнению исходного реактопласта до 34%, комбинированной матрицы — до 5% без ухудшения эластичности.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ И МОДЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ ДЛЯ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТРЕНИРОВОЧНОГО ПРОЦЕССА

Ю.Г. Кузьминский

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,
guk49mpri@mail.ru

Введение. Нагрузочный тест «покой — нагрузка — восстановление» является наиболее доступным инструментальным средством контроля тренировочного процесса. Ограниченные информационные возможности тонометрии, включающие определение артериального давления и частоты пульса, могут быть расширены применением компьютерных технологий с использованием данных, получаемых методом фотоплетизмографии (ФПГ) [1]. Проведение мониторинга гемодинамики спортсменов массовых квалификаций в процессе тренировок с большим количеством участников предъявляют к соответствующим программно-аппаратным комплексам требования простоты, и высокой информативности при экономии временных и материальных затрат [2].

Методология. Методом расчета значений параметров гемодинамики является одномерное моделирование ламинарного течения крови в артериальной части сердечно-сосудистой системы. Исходными данными модели являются значения параметров антропометрии и ФПГ. Уровень физической нагрузки, гемодинамические параметры сердца, сосудов биохимические параметры крови являются выходными данными. Дополнительным условием является соответствие потребляемого и поставляемого количества кислорода.

Разработанное программно-аппаратное обеспечение «Ф-СПАС» осуществляет обработку данных опроса датчика ФПГ (РЦПЧ БГУ) в процессе стандартного нагрузочного тестирования с частотой 200 Гц в течение всех фаз нагрузочного тестирования. Результат расчета включает 18 параметров сердца, сосудов, реологии крови, функционального состояния, вариабельности сердечного ритма. В протоколе представлены осредненный профиль отклонения от норм значения функциональных и гемодинамических параметров, схемы диагностики гипертонии и сердечной недостаточности, результат сравнения мгновенного профиля пульсовой ФПГ-волны с патологическими из архива. Мгновенные параметры гемодинамики отображены в профиле отклонения от норм, сравнении с осредненными данными. Ключевым диагностическим инструментом являются уровни аэробного энергообеспечения текущей нагрузки (стрессовой нагрузки).

Методика апробирована на различных группах спортсменов (студентах различного спортивного профиля ГГУ им. Ф. Скорины и военно-транспортного факультета БелГУТа).

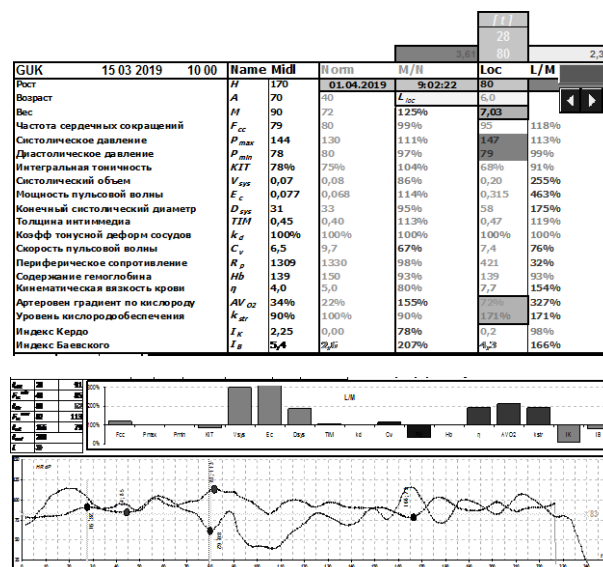


Рис. 1. Протокол мониторинга нагрузочного теста

Обсуждение результатов. На основе обработки полученных данных выявлены следующие закономерности:

- кратковременное достижение критического уровня параметра кислотно-щелочного равновесия $pH = 6,9$ и трехкратное увеличение систолического объема;

- стандартное определение момента завершения периода восстановления, как возврат частоты пульса к исходному значению, не совпадает с продолжительностью полной компенсации долга энергообеспечения.

Преимуществами предложенной методики мониторинга являются простота, экономичность, информативность и скорость, что позволяет использовать ее при проведении тренировок и занятий физической культурой. Удобство использования ФПГ-датчика значительно превосходит аппаратуру окклюзионной тонометрии.

1. Sanuki H., et al. Cuff-less Calibration-free Blood Pressure Estimation under Ambulatory Environment using Pulse Wave Velocity and Photoplethysmogram Signals // In Proc. of the 10th Intern. Joint Conf. on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2017), P. 42-48 ISBN: 978-989-758-212-7
2. Шилько С.В., Кузьминский Ю.Г., Борисенко М.В. Биомеханическая диагностика гемодинамики сердечно-сосудистой системы // В кн. Инновационные аспекты современной медицины. Ч. 2. Новосибирск, СибАК, 2014. С. 11—41.

ЭФФЕКТИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

К.С. Негматова¹, Ж.Н. Негматов²

¹Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт» Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова,

²Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан

Применяемые в настоящее время химические реагенты для бурения нефтяных и газовых скважин в Узбекистане, в частности на плато-Устюрт, такие, как КМЦ-600, К-4, К-9 и другие, являются дорогостоящими реагентами, завозятся, в основном, из-за рубежа за валюту и при вскрышных процессах бурения продуктивных горизонтов не дают требуемого эффекта.

Для освоения нефтегазоконденсатных месторождений плато-Устюрт, необходимо пробурить более 800 тысяч погонных метров разведочно-эксплуатационных скважин. Скважина, является важным и основным инженерным сооружением, вскрытие продуктивных нефте-газоконденсатных горизонтов в земной толще осуществляется для выхода газового конденсата на поверхность через эксплуатационные колонны обсадных труб.

Для качественного бурения скважин, в свою очередь, требуются эффективные промывочные жидкости, хорошо очищающие забой скважины от выбуренной горной породы, образующие тонкую корку с гладкой поверхностью на стенках скважин по диаметру окружности скважины. Ею создается противодавление на стенки скважины, и тем самым, предупреждается обрушение горных пород. Это также приводит к качественному вскрытию продуктивных газоконденсатных горизонтов, благодаря определенному физико-химическому взаимодействию реагентов.

В связи с этим, в течение ряда лет научно-педагогическими сотрудниками Государственного унитарного предприятия «Фан ва тараккиёт» и Ташкентского государственного технического университета, совместно с научными сотрудниками ООО NTTS “KOMPOZIT” и ООО “MECHANOKIMYO TECHNOLOGIYA” проводятся исследования по разработке эффективных композиционных полимерных реагентов с использованием местных и вторичных сырьевых ресурсов республики. Разрабатываемые полимерные композиционные реагенты, благодаря хорошему физико-химическому взаимодействию, обеспечивают синергический эффект и оказывают сильное стабилизирующее действие на свойства буровых растворов, улучшают качество обволакивания из под долота выбуренной породы и обеспечивают хорошую промывку забоя скважины, не допускают вторичного дробления горной породы и тем самым обеспечивают также увеличение механической скорости бурения и,

соответственно, производительности процесса бурения скважин. Исследованиями установлено, что при этом не кальматруется флюид промывочной жидкости вглубь продуктивного пласта и качественно вскрываются продуктивные газоконденсатные горизонты в скважине.

Разработанные композиционные полимерные реагенты состоят, в основном, из каустической соды, кальцинированной соды и отхода производства азотных удобрений, в составе которого содержится полиакриламид. Они отличаются от импортируемых реагентов, таких как КМЦ-600, К-4, К-9, экологической безвредностью, повышенной эффективностью вскрытия в процессе бурения продуктивных горизонтов нефти и газа на 50—55%.

Кроме этого, при использовании буровых растворов на основе разработанных композиционных полимерных реагентов, которые отличаются доступностью и дешевизной, повышается механическая скорость бурения на 10—15%.

Разрабатываемые реагенты апробированы при бурении разведочных скважин на воду глубиной от 100 до 2000 метров в ПГО «Узбекгидрогеология». Как показали результаты испытания, механическая скорость бурения возросла на 20%, а вскрытие продуктивных водоносных горизонтов увеличилась на 20—25%.

Предварительно проведенные технико-экономические расчеты показали, что использование разработанной нами рецептуры полимерных композиционных жидкостей при бурении (800 тыс п.м.) газоконденсатных скважины за счет увеличения механической скорости на 10—15%, вскрытий продуктивных нефтегазоконденсатных горизонтов на 50—55%, а также дешевизны полимерных композиционных жидкостей даст экономический эффект более десятка миллиардов сумов.

1. Negmatov S.S., Negmatova K.S., Salimsakov Yu.A., Rakhimov H.Y., Negmatov J.N., Isakov S.S., Kobilov N.S., Sharipov G.N., Negmatova M.I. Structure and Properties of Viscous Gossypol Resin Powder // AIP Advances. American Institute of Physics, USA, 2012. — pp. 300—302.
2. Negmatov S.S., G.Yu. Akmalova, N.S. Gulyamova, V.N. Zai-nutdinov, G.R. Raxmanberdiev, K.S. Negmatova, M.I. Negmatova. Preparation of Biomaterials on the Basis of a Water-Soiuble Ceilulose Acetate // AIP Advances. American Institute of Physics, USA, 2012. — pp. 293—295.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КРАШЕНИЯ ВОЛОКОН И ТКАНЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

М.Н. Негматова¹, Ш.Н. Расулова²

¹Ташкентский химико-технологический институт,

²Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт» (Наука и прогресс) Ташкентского государственного технического университета им. И.А. Каримова

Отсутствие не только в Узбекистане, но и во всем Центральном Азиатском регионе анилино-красочной промышленности ставит перед учеными задачу разработки технологии крашения текстильных материалов на основе натуральных и синтетических волокон без применения традиционных красителей, используя местные сырьевые ресурсы.

Целью данного сообщения является изучение механизма нетрадиционного способа крашения полиакрилонитрильных волокон и текстильных материалов на их основе путем синтеза красителя на волокне.

Одной из важнейших задач стоящих перед текстильной промышленностью является разработка и внедрение более эффективных технологических процессов, направленных на выпуск продукции лучшего качества при меньших затратах сырья, электроэнергии, производственной площади и т.д. Одним из таких процессов является колорирование тканей путем синтеза пигментов в волокне. В этом случае отпадает необходимость проведения сложной операции синтеза красителей на заводах изготовителях, что удешевляет процесс выработки окрашенной ткани [1].

Сложность решения проблемы заключается в выборе таких полупродуктов, которые отвечали бы комплексу требований: достаточно легкая диффузия в волокне и сорбция на внутренней поверхности; высокая скорость реакции, проводящая к синтезу красителя; условия реакции достаточно мягкие, не приводящие к деградации волокна.

Как известно, многие ионы переходных металлов образуют с бесцветными лигандами интенсивно окрашенные комплексы. Длина волны поглощения, а также интенсивность поглощения сильно зависят от характера лиганда и от природы катиона и координационного числа. Широко известны окрашенные комплексы катионов металлов переменной валентности с амино и карбоксильными, азо, нитро и др. группами.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явилось разработка способа крашения белковых волокон путем образования в структуре волокна комплексных соединений. Белковые волокна являются высокомолекулярными соединениями, построенными главным образом из ациклических, карбоциклических и гетероциклических аминокислот и содержат значительное количество амино- и карбоксильных групп, способные вступать в реакции нуклеофильного и электрофильного замещения. Амины и карбонилы обладают свойством образования координационных связей. С катионами поливалентных металлов, таких как железо, никель, кобальт, медь, имеющих собственные хромофорные свойства, образуют окрашенные комплексы. Пер-

вичные аминогруппы способны диазотироваться с образованием азогрупп, которые обладают высокой активностью и образуют яркие комплексы с катионами переменной валентности. Наличие в белковых волокнах аминокислот, содержащих ароматические ядра (тирозин, триптофан) дает возможность образования комплексных соединений хелатного типа с катионами поливалентных металлов.

Изучена возможность окрашивания белковых волокон растворами солей меди, железа, кобальта, никеля. Результаты исследований показали, что при обработке белковых волокон водными растворами солей металлов Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} они приобретают тусклые окраски, которые легко удаляются с волокна при последующей промывке.

Обработка белковых волокон растворами солей Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} в присутствии нитрита натрия способствовало получению ярких и прочных окрасок. При действии на белковые волокна нитрита натрия в кислой среде претерпевают изменения все аминогруппы волокна. Не исключена возможность перехода части аминогрупп в азогруппы и дальнейшее взаимодействие с катионами металлов переменной валентности с образованием комплексных соединений.

Эффективным методом изучения процессов комплексобразования является спектрометрия в видимой области. Изучены спектры поглощения растворов окрашенных белковых волокон в 10% растворе гидроксида натрия. По-видимому, значительных изменений строения комплексов при растворении волокна не происходит, о чем свидетельствует сохранение цветового тона раствора. Однако полностью исключить перестройки комплексов нельзя, так как еще Цоллингер указывал на возможность диспропорционирования комплексов азокрасителей с металлами в сильнощелочной среде.

Окрашивание белковых волокон при обработке композициями солей щелочных и поливалентных металлов свидетельствует об образовании в полимерной матрице белковых волокон комплексных соединений. Образование комплексов в белковых волокнах подтверждается также результатами спектрофотометрических измерений. Спектр поглощения шерстяного волокна, окрашенного композицией солей щелочных поливалентных металлов, характеризуется интенсивной полосой поглощения при 800–850 нм, что является следствием химического взаимодействия функциональных групп волокна с катионами металлов с образованием прочных комплексных соединений.

1. Sayibjan Negmatov, Shoxista Rasulova, Malika Negmatova. Powdery Painting Compositions Universal Dyes for Dyeing Natural and Synthetic Fibers and Textile Materials on their Basis // Journal of Chemical Engineering and Chemistry Research USA 2014, July 25. pp.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОЙ ФОРМЫ ХОНДРОИТИН СУЛЬФАТА

В.И. Николаев¹, С.Ф. Ермаков², Д.А. Зиновкин¹

¹Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; nikolaev.v.i@mail.ru

²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

Цель

Изучить влияние жидкой лекарственной формы хондроитин сульфата (ХС) на смазочную способность сыворотки крови (СК) и суставной хрящ.

Материалы и методы исследования

В экспериментальных исследованиях в качестве смазочного материала использовали сыворотку крови человека, жидкую лекарственную форму ХС, лабораторные животные (крысы).

Проведены измерения коэффициента трения естественной пары хрящ—хрящ, в зависимости от числа колебаний маятникового трибометра.

Внутрисуставное введение ХС лабораторным животным проводилось 3-ы с интервалом в 7 дней.

Морфометрические параметры гистологических препаратов проведены по общепринятой методике.

Результаты и их обсуждение

Из экспериментальных данных следует, что смазочный биокомпозит СК + ХС, по трибологическим параметрам приближается к натуральной синовиальной жидкости (рис. 1).

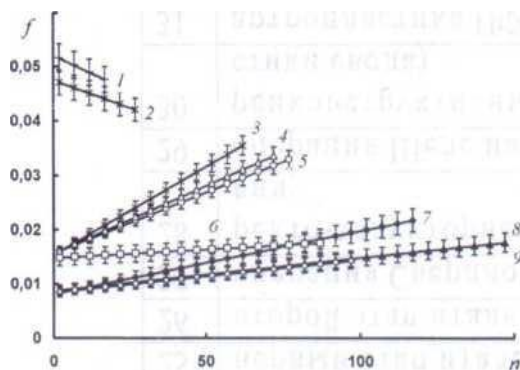


Рис. 1. Зависимости значений коэффициента трения f от числа колебаний маятникового трибометра n , полученные при трении естественной пары хрящ—хрящ в присутствии: 1 — дистиллированной воды; 2 — физиологического раствора; 3 — сыворотки крови; 4 — сыворотки крови + 50% ЛП₁; 5, 6 — ЛП, содержащих ГУК, соответственно; 5 — ЛП₁ «Стекловидное тело»; 6 — ЛП₂ «Остенил»; 7 — ЛП₃, содержащего хондроитин сульфат; 8 — сыворотки крови + 50% ЛП₃; 9 — синовиальной жидкости

Данные морфометрии гистологических препаратов показали, что средняя толщина суставного

хряща в экспериментальной группе была $225,4 \pm 14,4$ мкм, в контрольной группе данный показатель составлял $194,2 \pm 18$ мкм. При анализе данного показателя в обеих группах выявлялась статистическая разница ($p = 0,0019$). Увеличение толщины суставного хряща происходило преимущественно за счет пролиферации глубоких слоев хондроцитов.

Исследованная средняя толщина губчатого вещества кости у животных экспериментальной группы составляла $825,2 \pm 127,2$ мкм, в контрольной группе — $827,8 \pm 42,5$ мкм. При сравнения данного показателя в экспериментальной и контрольной группе животных не было выявлено статистической значимости ($p = 0,909$). Микроскопически губчатое вещество кости было представлено костными балками с располагающимся между ними нормоклеточным костным мозгом, при этом в экспериментальной группе отмечалась его очаговая гиперплазия.

В экспериментальной группе, при морфометрии, средняя толщина зоны хряща роста эпифиза составляла $186,5 \pm 6,7$ мкм, в контрольной — $166,3 \pm 6,6$ мкм. При анализе толщины зоны роста метафизов костей была установлена статистически значимая разница ($p = 0,002$). Следует отметить, что утолщение зоны роста метафиза происходило за счет хрящевой метаплазии костных балок губчатого вещества кости.

Хрящевая метаплазия является проявлением регенераторного процесса суставных хрящей. Данные изменения были выраженными в экспериментальной группе в 50% случаев, в контрольной в 20%. При анализе данного показателя в экспериментальной и контрольной группе была выявлена статистическая разница ($p = 0,0001$).

Таким образом, внутрисуставное введение препарата на основе хондроитин сульфата приводит к статистически значимому ($p < 0,05$) увеличению как суставного хряща, так и хряща зоны роста метафиза, что является морфологическим проявлением активации регенераторных процессов в них. Данные трибологических исследований являются основой для разработки новых более эффективных методов и средств коррекции синовиальной среды суставов при их дегенеративных поражениях.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ МЕДЬ/СЕРЕБРО

Х.А. Новик¹, Ж.В. Игнатович¹, Л.Н. Филиппович²¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь²Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Наночастицы серебра (Ag), меди (Cu) и их композиты находят широкое применение в таких областях как медицина, электронные и оптические устройства, биосенсоры [1]. Цель работы — разработать эффективный метод синтеза композитов Cu/Ag для последующего включения в поливинилспиртовые пленки с улучшенными спектральными характеристиками; исследовать морфологические и размерные параметры композитов с использованием методов динамического рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии.

Материалы и методы. 2,3 г крахмала растворили в 120 мл дистиллированной воды, прибавили 50 мл раствора $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,092—0,1 М). Перемешивали на магнитной мешалке при 30 °С в течение 30 мин. Затем добавили 50 мл 0,2 М раствора аскорбиновой кислоты, 0,1—0,476 г AgNO_3 . Увеличили температуру нагрева до 80 °С, добавили по каплям 30 мл 1 М раствора NaOH, перемешивали 1,5 ч. Осадки композитов отделяли центрифугированием 15000 об./мин, с последующей промывкой дистиллированной водой и этанолом. Гидродинамический диаметр композитов определяли методом динамического рассеяния света, состав подтверждали элементным анализом, морфологию частиц определяли методом сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и обсуждение. Композиты Cu/Ag образуют агломераты диаметром от 1000 до 3800 нм, как в среде этанола, так и в смеси вода-этанол. Наибольший диаметр агломератов 2160 нм получен при соотношении медь:серебро 2:1 (табл. 1)

Таблица 1. Гидродинамическая характеристика композитов медь-серебро

Отношение Cu:Ag	Разведение	Средний диаметр частиц, нм	Индекс полидисперсности PdI
4:1	10	3430	0,990
	20	2210	0,204
	40	1590	0,742
	100	1160	0,433
3:1	10	2460	0,920
	20	3560	0,990
	40	3130	0,780
	100	1030	0,079
2:1	10	3180	1,000
	20	3100	1,000
	40	3800	1,000
	100	2160	0,882
1:1	10	3190	0,029
	20	1900	0,560
	40	2450	0,732
	100	2590	0,359

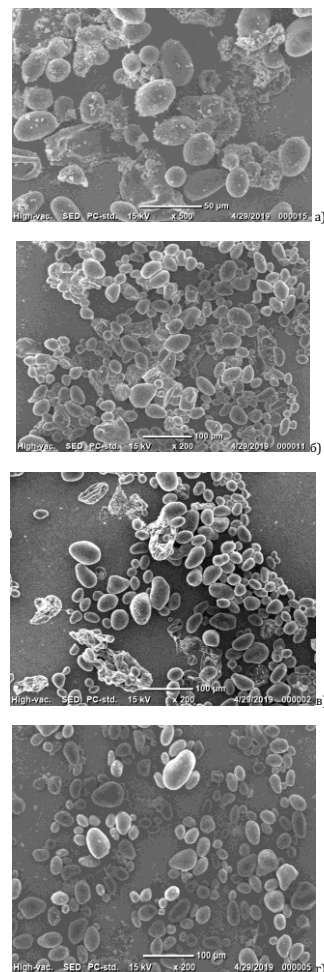


Рис. 1. СЭМ-изображения композитов медь/серебро, отношение компонентов: а) 4:1; б) 3:1; в) 2:1; г) 1:1

Данные СЭМ хорошо согласуются с гидродинамическими характеристиками композитов.

Согласно данным элементного анализа содержание меди варьируется от 24 до 65%, содержание серебра практически составляет от 20 до 25%.

Таким образом, разработан эффективный метод гидротермального синтеза и получены композиты Cu/Ag (рис. 1, а-г) для последующего включения в поливинилспиртовые пленки, средний размер агрегатов Cu/Ag составил от 2,5 до 1 мкм.

Работа выполнялась при финансовой поддержке БРФФИ, проект X18-029.

1. Ayesha Khan, Audil Rashid, Rafia Younas, Ren Chong. A chemical reduction approach to the synthesis of copper nanoparticles, International Nano Letters. 2016. Vol.6, 21—26

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ГИДРОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ И БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН

К.В. Овчинников¹, Д.Л. Подобед², А.А. Давыдов¹, А.А. Тимофеев¹

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; ov-kv@mail.ru

²Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Гомель, Беларусь

Введение. Проблема повышения пожарной безопасности полимерных композиционных материалов в жилищном и промышленном строительстве определяется ужесточением нормативов по их горючести в процессе эксплуатации. Это формирует актуальность разработки новых композиционных материалов, в которых проблема естественной горючести полимерных компонентов компенсировалась бы влиянием добавок, в том числе по возможности недефицитных.

Цель работы: исследование роли комплексных добавок на основе бентонитовых глин в обеспечении приемлемого уровня пожарной опасности полимерных композитов.

Материалы и методы. Образцы композитов на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД) изготавливали на компьютеризированном экструзиографе «Rheocord 90» фирмы «НААКЕ». Добавки: бентонитовая глина, гидроксид магния, жидкое стекло, триполифосфат натрия. Для образцов определяли следующие показатели: максимальная температура газообразных продуктов горения (стандартизированный прибор ОТМ), время достижения максимальной температуры, потеря массы образцов после огневых испытаний.

Результаты и их обсуждение. Установлено (табл. 1), что добавление к полимеру комплексной негорючей добавки позволило повысить показатели огнестойкости композиционного материала. Наиболее благоприятный результат получен для состава на основе ПЭНД с 5 мас.% антипирена. Улучшение показателя огнестойкости и воспламеняемости достигло порядка 5%. Это позволило перевести рассматриваемые композиты из группы горючих сред-

невоспламеняемых в группу горючих трудновоспламеняемых материалов. Методом математического моделирования (дисперсионного анализа) установлена закономерность изменения свойств, характеризующих пожарную опасность, от содержания тех или иных функциональных добавок, описываемая формулой $y = 1,9252x^2 - 11,601x + 19,944$ при показателе сходимости результатов $R^2 = 0,9999$.

Выдвинуто предположение о том, что максимального улучшения искомых показателей можно добиться, применяя комплексные антипирены, компоненты которых осуществляют специфическую функцию в зависимости от степени и типа собственной физико-химической активности. Бентонитовая глина является негорючим неорганическим материалом (нестехиометрическая смесь оксидов металлов), совмещение которого с другими компонентами осуществляется за счет интенсивного смешения в расплаве полимера, в том числе путем межмолекулярного взаимодействия гидроксидов металлов с оксидами из состава глины при участии поверхностно активного вещества (триполифосфат натрия) и полифункционального связующего (жидкое стекло). Кроме того, триполифосфат натрия ингибирует горение на молекулярном уровне.

Заключение. Показана целесообразность разработки рецептур антипиренов, в которых ингибирующее по отношению к горению действие компонентов было бы обеспечено на всех доступных масштабных уровнях и было бы взаимодополняющим.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма ПМТ 6.52.

Таблица 1. Значения контролируемых параметров при экспериментальных огневых испытаниях композиционных образцов

Состав	Максимальная температура газообразных продуктов горения, °С			Время достижения максимальной температуры, с			Масса образца до испытаний, кг			Потеря массы образца, %		
	α_1	α_2	α_3	t_1	t_2	t_3	m_{n1}	m_{n2}	m_{n3}	Δm_1	Δm_2	Δm_3
Образец ПЭНД	606	619	615	276	278	282	0,0503	0,051	0,0478	18,49	19,61	18,41
Образец ПЭНД с 1% антипирена	429	420	425	297	295	295	0,0473	0,0501	0,0514	14,59	13,97	10,76
Образец ПЭНД с 2% антипирена	315	321	314	297	299	296	0,044	0,05	0,037	7,50	12,40	8,11
Образец ПЭНД с 5% антипирена	344	340	346	297	290	301	0,0415	0,0503	0,0426	18,80	10,93	11,97

ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ВОЛОКОН НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ ФТОРПОЛИМЕР + УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО

В.П. Селькин, А.С. Михневич, А.В. Упорова

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

Цель. Сегодня одним из направлений развития полимерного бизнеса является расширение производства фторсодержащих полимеров и разработка композитов различного назначения на их основе, в частности композиционных материалов армированных углеродными волокнами [1–3]. Использование углеродных волокон в качестве наполнителя фторопластов позволяет получать материалы с уникальным сочетанием упруго-прочностных показателей, электро- и теплопроводности, биологической инертности и низкой плотности. Целью настоящей работы было исследование на примере сополимера тетрафторэтилена и гексафторпропилена (ФЭП) влияния длины волокон на физико-механические характеристики композитов вида фторсодержащий полимер + углеродное волокно.

Методика и оснастка. Объектом исследования являлся ФЭП (фторопласт-4МБ марки П ТУ 301-05-73-90). Армирование полимера осуществляли путем наполнения его 15 мас.% углеродных волокон, которые получали на молотковой мельнице из углеродной ткани марки ЛО-1-12Н, производства ОАО «СветлогорскХимволокно». Разделение волокон по их длине на фракции (<50, 50–140, 140–200, 200–400 и >400 мкм) осуществляли на лабораторной гравитационно-просеивающей установке Siebtechnik ASM 200. Среднечисловое значение длины волокон во фракциях определяли путем количественного анализа цифрового изображения, полученного на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH. Образцы получали методом прессования при температуре 300–310 °С и давлении 20 МПа. Размеры образцов: 100 x 10 x 0,5 мм.

Физико-механические характеристики определяли по ГОСТ 14236 при максимальной рабочей температуре эксплуатации ФЭП методом растяжения на испытательной машине SHIMADZU Autograph AGS-1 kNX, снабженной инфракрасным керамическим нагревателем. Скорость растяжения 1 мм/мин, температура нагрева образцов 200±2 °С.

Результаты исследований. Установлено, что наполнение углеродными волокнами ФЭП приводит к существенному (до 5 раз) увеличению напряжения на начальном участке его растяжения и росту условного предела текучести материала нагретого до температуры 200 °С. При этом показано, что чем больше среднечисловое значение длины волокон наполнителя, тем выше напряжение растяжения и соответственно предел текучести композита (рис. 1). Особенно значительно зависимость проявляется при увеличении длины волокон в диапазоне до 200 мкм.

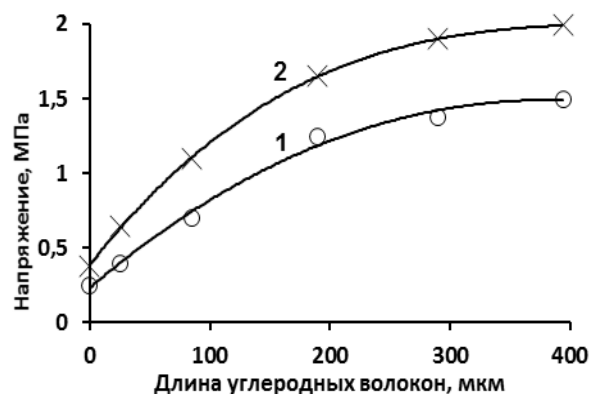


Рис. 1. Зависимость напряжения при растяжении композиции ФЭП до относительного удлинения 1% (1) и 2% (2) от среднечислового значения длины углеродных волокон (нулевое значение длины — результаты без наполнителя)

В тоже время с ростом длины волокон уменьшается относительное удлинение при разрыве получаемого композита. Так если данная характеристика ФЭП без наполнителя при 200 °С составляла не менее 200%, то для образцов композита с волокнами длиной 50–140 мкм она снизилась до 8–9%, а с волокнами длиной более 200 мкм до 1,5–2%.

Выводы. Показано, что при наполнении фторсодержащих полимеров, в частности ФЭП, углеродными волокнами одним из основных факторов влияющих на предел текучести при растяжении получаемых композитов является длина волокон. При этом чем больше значение длины волокон, тем выше предел текучести. Однако увеличение их длины приводит к падению такой характеристики композита, как относительное удлинение при разрыве.

Таким образом, при изготовлении композиционных материалов на основе фторполимеров, наполненных углеродными волокнами, в первую очередь необходимо учитывать длину преобладающей фракции волокна в получаемом сырье, осуществляя его выбор в зависимости от назначения композита.

1. Максимов Б.Н., Барабанов В.Г., Серушкин И.Л. и др. Промышленные фторорганические продукты. Справочник. Изд. 2-е. — Л.: Химия. — 1996
2. E.Ya. Beider, A.A. Donskoi, G.F. Zhelezina, E.K. Kondrashov, Y.V. Sytyi, and E.G. Surmin. An experience of using fluoropolymer materials in aviation engineering // Russ. J. Gen. Chem. — 2009 (79), No. 3, 548–564
3. V.P. Selkin, A.V. Makarenko, S.V. Kopylov. The Effect of the Carbon-Fiber Reinforcement of Thermoplastic Fluoropolymers on Their Wear under Heavy Loads // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), No. 2, 99–102

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

В.П. Селькин, О.С. Стерехов

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

Цель. Компания Shimadzu Corporation — один из крупнейших мировых производителей в отрасли научного приборостроения. Лидирующие позиции в мире занимает их оборудование для проведения механических испытаний, в частности универсальные испытательные машины серии Autograph AGS. Для испытания материалов при высоких температурах машины комплектуются нагревательными печами. Однако данное оборудование значительно увеличивает время проведения эксперимента из-за длительности выхода на заданную температуру после смены образцов. В тоже время использование вместо печи инфракрасных нагревателей позволяет в ряде случаев, например при растяжении полимерных пленок, значительно ускорить процесс испытания. Целью настоящей работы была разработка дополнительной оснастки с использованием инфракрасных керамических нагревателей для испытания полимерных пленочных и листовых материалов на растяжение при высоких температурах на испытательной машине SHIMADZU Autograph AGS-X.

Методика и оснастка. Для решения задачи испытательную машину снабдили специальным приспособлением, которое генерирует направленный поток инфракрасного излучения при помощи снабженного рефлектором керамического нагревателя (рис. 1 и 2).

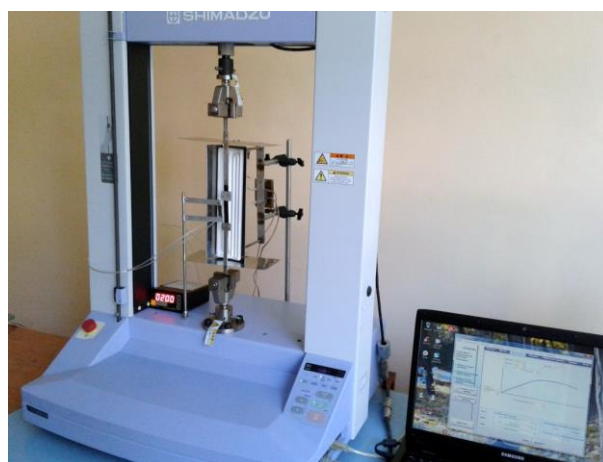


Рис. 2. Приспособление для испытания материалов на растяжение при высоких температурах, установленное на испытательную машину SHIMADZU Autograph AGS-1kNX

Для устранения влияния на равномерность температуры по длине испытываемых образцов конвекционной составляющей сверху и снизу рефлектора были установлены два дополнительных экрана. С целью ускорения процесса исследования образцы закрепляются не непосредственно в зажимах машины, а в промежуточных держателях, выполненных из материала с низкой теплопроводностью. Данное решение при наличии нескольких комплектов держателей позволяет осуществлять быструю смену образцов при поддержании постоянного режима работы нагревателя. Регулирование и контроль температуры осуществляется измерителем-регулятором «Сосна-003М», снабженным датчиком температуры представляющим собой термопару, горячий спай которой помещен в идентичном испытываемым контрольным образце.

Выводы. Разработанная оснастка позволяет с высокой оперативностью осуществлять испытания на растяжение образцов полимерных материалов толщиной до 1 мм в широком диапазоне температур (до 300 °С) на стандартных испытательных машинах, например SHIMADZU Autograph AGS-X, без использования дорогостоящих специальных печей.

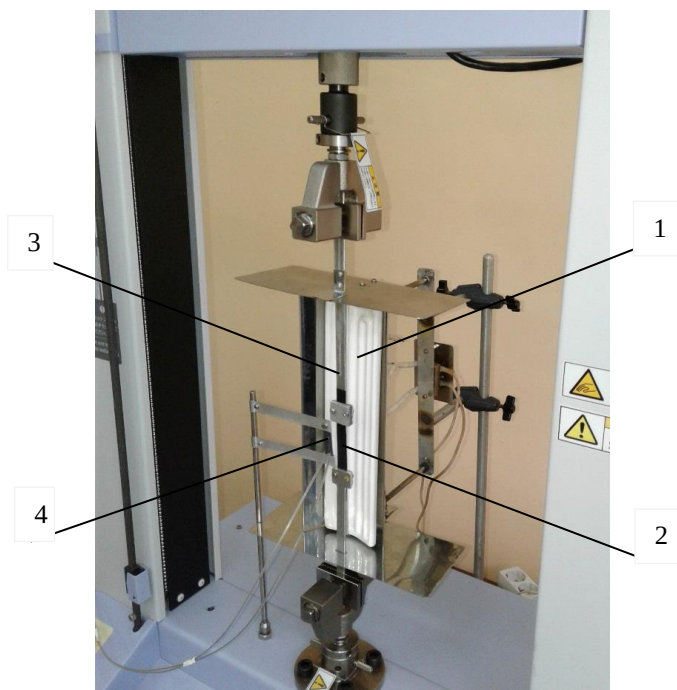


Рис. 1. Приспособление для испытания материалов на растяжение при высоких температурах: 1 — керамический ИК-излучатель с отражающими экранами; 2 — образец; 3 — держатели образца из материала с низкой теплопроводностью; 4 — датчик температуры

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВТОРИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.А. Тимофеев¹, Е.А. Шутова², В.П. Дубодел², О.Е. Пантюхов³

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
timoshenko13@gmail.com

²Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь;

³Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Одним из направлений, связанным с переработкой вторичных полимеров, является разработка на их основе композиционных материалов с использованием различных наполнителей, в том числе, отходов производства. Использование наполненных вторичных термопластов особенно актуально при производстве полимерпесчаных изделий. Полимерпесчаные изделия являются относительно новым видом строительных материалов, являясь хорошей альтернативой традиционному бетону, например, в производстве тротуарной плитки [1].

Составными компонентами смеси для изготовления полимерпесчаных изделий являются дробленые вторичные полимеры и кварцевый песок, которые и определяют комплекс физико-механических и технологических свойств [2]. Несмотря на достаточно высокий уровень эксплуатационных свойств таких изделий (устойчивость к воздействию воды и масел, пластичность смеси, облегчающая формовку будущего изделия и приемлемые прочностные свойства), они обладают и существенным недостатком, что выражается в ухудшении физико-химических свойств при воздействии на них УФ-излучения, щелочной и кислотной сред. Воздействие УФ-излучения на полимерные материалы ускоряет протекание окислительных процессов и запускает термодеструктивные. В свою очередь это приводит к проявлению хрупкости полимерного материала и, следовательно, снижению прочностных свойств. Так как в высоконаполненной композиции равномерное распределение полимера между частицами кремниевого песка является определяющим для получения стабильной прочности, протекание термодеструктивных процессов в полимере крайне нежелательно. В связи с этим для улучшения прочностных свойств материала предложено вводить в него функциональные добавки, снижающие воздействие УФ-из-

лучения.

Введение в полимерпесчаный материал стабилизирующей добавки в виде модифицированных антиоксидантов затормаживает окислительные процессы во вторичном полимере, который после первичной переработки характеризуется изменением физико-химических свойств полимерной матрицы. На это указывает и увеличение индукционного периода окисления (ИПО) образцов по сравнению с аналогичными образцами полимера, содержащими исходные аминные антиоксиданты. Испытания образцов в течение 6 месяцев показали снижение интенсивности показателя прочности композита на 17—22%.

Одной из возможностей улучшения стойкости материала к УФ-излучению является применение в нем комбинированных наполнителей, например, сочетание кварцевого песка и кремнегеля, которые отличаются размерами частиц наполнителя. Ультрадисперсность кремнегеля способствует физико-химической активизации полимерной матрицы в композиционной системе, что приводит к усилению адгезионного взаимодействия в системе «наполнитель—полимер» и улучшению однородности материала. Перспективен также подход, заключающийся во введении в композицию теплоаккумулирующих добавок. Интерес вызывает обработка внутренней поверхности полимерпесчаных изделий битумно-полимерной композицией, что способствует повышению долговечности материала путем улучшения его водоотталкивающих свойств.

1. Шаповалов, В.М. Рециклинг полимерных материалов / В.М. Шаповалов, З.Л. Тартаковский, С.Г. Кудяк // Наука и инновации. — 2012. — № 9. — С. 9—11.
2. Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: А.Р. Волик (гл. ред.) [и др.]. — Гродно: ГрГУ, 2018. — 155 с.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПОЛИУРЕТАНОВ

А.А. Тимофеев¹, А.Н. Радюк²¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
timoshenko13@gmail.com²Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

Введение. В обувной промышленности для производства 40% от всего объема подошв используют полиуретан (ПУ). При производстве полиуретанового низа обуви существенной проблемой является образование значительных количеств отходов: выпрессовок, литников и бракованных подошв. Одним из направлений решения данной проблемы является целевая переработка данных отходов ПУ.

Цель работы — получение новых композиционных материалов на основе смесей из промышленных отходов ПУ.

Материалы и методы. В качестве основного компонента композиционных материалов использовали вторичное полимерное сырье в виде отходов ПУ обувных предприятий г. Витебска. Они представляли собой смесь (микст) пенополиуретана и термопластичного ПУ, которые в условиях литья под давлением способны формировать эластичную полимерную матрицу. С целью повышения технологичности переработки материала применяли дополнительные модифицирующие ингредиенты: масло индустриальное (ТУ 0253-003-71148628-2005) и стеарат кальция (ТУ У 24.1-34767516-003:2008).

Высушенный дробленый микст ПУ с размером частиц менее 15 мм подвергали экструдированию («RHEOCORD 90» HAAKE) при температурах по зонам материального цилиндра 160, 180, 190 °С и скорости вращения шнека 50 об/мин с последующим гранулированием до получения гранул с размером 2—4 мм. Пористость гранул и отливок из них анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) «VEGA II» LSH фирмы TESCAN — рис. 1.

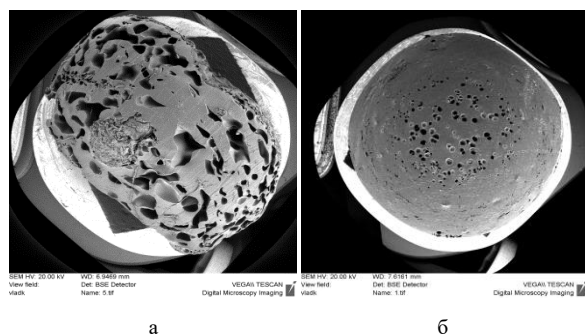


Рис. 1. Пористость полученных гранул (а) и отливок из них (б)

На основе полученного гранулята на машине Main Group SP345/3 по промышленной технологии

получали заготовки (пластины) при следующих режимах: температура по зонам 140—155 (1), 145—160 (2) °С, время подачи материала — 15—20 с, выдержка — 240 с.

Результаты и их обсуждение. Испытания физико-механических и эксплуатационных свойств композиционных материалов позволили получить данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Свойства композиционных материалов

Показатель	Значение
^А Относительное удлинение при растяжении, %	256
^А Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	8,3
^А Модуль упругости при растяжении, МПа	21,3
Твердость по Шору А, усл.ед. (ГОСТ 263-75)	80
Плотность, г/см ³ (ГОСТ 267-73)	1,0
Толщина, мм (ГОСТ 11358-89)	6,5
^В Условная прочность, МПа	5,8
^В Относительное удлинение при разрыве, %	265
^В Остаточное удлинение после разрыва, %	20
Сопротивление истиранию, Дж/мм ² (ГОСТ 426-77)	5,0

А — физико-механические характеристики определяли на измерительном комплексе «INSTRON 5567» по ГОСТ 11262-80; В — упруго-прочностные характеристики определяли по ГОСТ 270-75.

Установлено, что физико-механические и эксплуатационные свойства пластин, содержащие вторично переработанный микст отходов ПУ, имеют показатели выше нормируемых значений, приведенных в ГОСТ 10124—76 для материалов, применяемых в обувном производстве. Для достижения таких результатов необходимым условием явилось снижение пористости вторичного ПУ, для чего использовали процесс его грануляции с введением функциональных добавок.

Практическая ценность и значимость результатов работы подтверждается апробацией в производственных условиях ООО «Обувное ремесло» (г. Витебск). По полученным композициям разработана нормативно-техническая документация, применяемая при изготовлении деталей низа обуви. В дальнейшем возможно получение полимерных композиций на основе отходов ПУ с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами за счет наполнения и целевого модифицирования полимерной матрицы. Это позволит расширить ассортимент материалов для низа обуви и сырьевую базу отечественных обувных производств.

ОЦЕНКА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ПРОДУВАНИЮ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

А.С. Тулейко

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

В последнее время в строительстве, автомобилестроении и других отраслях широкое применение получили нетканые теплозвукоизолирующие материалы и различные конструкции, например, сэндвич-панели на их основе. К нетканым материалам относят текстильные изделия, изготавливаемые из натуральных и химических волокон или нитей, соединяемых между собой без применения ткацкого станка. Звукопоглощающие материалы и сэндвич-панели относятся преимущественно к строительным материалам, уровень качества которых практически невозможно оценить визуально. Данные материалы проходят определённый технологический контроль на каждом этапе производства на соответствие готового продукта соответствующим техническим нормам. В связи с возросшими объемами применения нетканых волокнисто-пористых материалов возникла необходимость экспресс-оценки их звукопоглощающих свойств.

Стандартные методы определения коэффициента звукопоглощения, основанные на использовании сложного и дорогостоящего оборудования, не всегда доступны потребителю. Поскольку исследуемые материалы воздухопроницаемы, то представляется возможным осуществлять промежуточный контроль качества материала по сопротивлению продуванию воздушным потоком, для которого заранее найдены коэффициенты звукопоглощения. В этом случае сопротивление продуванию воздушным потоком рассматривается как информативный показатель, по которому можно судить о звукопоглощающей способности материала [1].

Данный способ оценки упрощает промежуточный контроль по показателю звукопоглощения и может применяться для различных толщин звукопоглощающего материала или сэндвич-панелей. Оценка звукопоглощения волокнисто-пористых материалов заключается в измерении удельного сопротивления продуванию потоком воздуха R_s (коэффициент сопротивления продуванию воздушным потоком) и определении коэффициента звукопоглощения α на заданной частоте по регрессионным уравнениям, связывающим R_s и α при известной толщине.

В качестве объектов исследования были выбраны волокнисто-пористые нетканые материалы на основе природных (льняные) и синтетических (полипропиленовые или полиэфирные) волокон производства ОАО «БЕЛФА». Испытывали образцы материала в виде цилиндра с диаметром основания 120 мм и высотой $h=10$ мм. По результатам измере-

ний коэффициента звукопоглощения и сопротивления продуванию строили регрессионные уравнения, связывающие R_s и α .

На рис. 1 приведены регрессионные зависимости $R_s(\alpha)$ материалов различного состава для частоты 700 Гц. Каждая точка на кривых соответствует определенной толщине образца, начиная от 10 мм и заканчивая 120 мм, с интервалом толщин в 10 мм. На рис. 1 видно, что если материал имеет сопротивление потоку воздуха R_s порядка $11 \cdot 10^3$ Па·с/м, то коэффициент его звукопоглощения на частоте 700 Гц лежит в диапазоне $0,45 \div 0,65$ при толщине образцов более 20 мм.

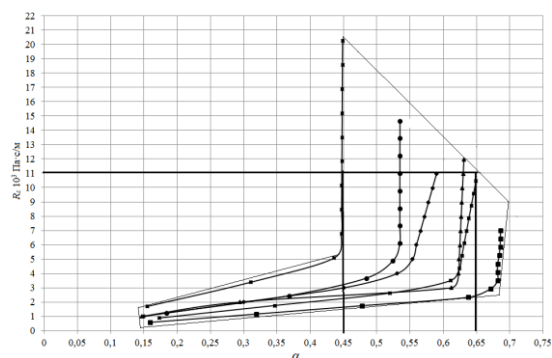


Рис. 1. Регрессионные зависимости $R_s(\alpha)$ материалов различного состава на частоте 700 Гц

Таким образом, зная толщину образца и коэффициент сопротивления продуванию воздушным потоком, представляется возможным оценить коэффициент звукопоглощения волокнисто-пористых материалов на основных рабочих частотах.

Заключение. Предложен экспресс-метод оценки звукопоглощения волокнисто-пористых материалов на основе натуральных и синтетических волокон по величине сопротивления продуванию воздушным потоком. Получены регрессионные зависимости, связывающие сопротивление продуванию с коэффициентом звукопоглощения. Показано, что коэффициент звукопоглощения на основных рабочих частотах можно оценить по значениям сопротивления продуванию воздушным потоком и толщины волокнисто-пористых материалов.

1. Sergienko V.P. Development of new environmental safety sound-absorbing materials and layered sound-proofing structures for transport taking into account the spectral characteristics of the noise / V.P. Sergienko, S.N. Bukharov, V.V. Kozhushko, A. Alexiev, Y. Mirchev, E. Barkanov // Proceedings NTD days-2015, Sozopol. 15—19 June 2015.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОПОГЛОШАЮЩИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.У. Улмасов, О.Ш. Сабирова, А.Р. Сатторов

Государственное унитарное предприятие «Фан ватараккиёт» Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

Наполненные полимерные композиционные материалы представляют собой гетерогенные, гетерофазные системы, свойства которых зависят от свойств исходных материалов и параметров образующейся структуры [1]. В качестве параметров структуры наполненного композита обычно используют размер частиц, дисперсность, соотношение долей компонентов и максимальную объемную долю наполнителя. По общепринятым представлениям [2] структура наполненного полимерного материала состоит из полимерного связующего и расположенных в нем частиц наполнителя, причем при высоком содержании наполнителя матрица переходит в пленочное состояние и частицы наполнителя контактируют между собой.

При уменьшении содержания наполнителя соответственно увеличивается объемная доля полимера, что приводит к раздвижке частиц наполнителя.

Затухание колебаний или механические потери вибропоглощающего покрытия характеризуют теми показателями, которые инженеру удобнее получить в данном конкретном случае. Поскольку существует много различных методов динамических испытаний, широко используются несколько показателей количественной оценки вибропоглощающих свойств материалов: тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ коэффициент потерь η , логарифмический декремент колебаний Δ , относительное рассеяние или коэффициент поглощения Ψ . Все они связаны между собой следующим соотношением:

$$\eta \approx \operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'} \approx \frac{\Delta}{\pi} \approx \frac{\Psi}{2\pi} \quad (1)$$

где E'' и E' — модуль потерь и накопленная энергия материала соответственно.

Коэффициент потерь наполненного полимерного материала рассчитывается по формуле:

$$\eta_{н.с.} = \frac{D_S}{2\pi U} = \eta_m \frac{k}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + k^2 \eta_m^2}} \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что введение наполнителя снижает диссипативные свойства полимера, тем больше, чем больше масса наполнителя.

Пренебрегая массой частиц наполнителя и имея ввиду малость η_m^2 , коэффициент потерь напол-

ненного композиционного материала будет равен коэффициенту потерь полимерного связующего:

$$\eta_{н.с.} \approx \eta_m$$

Эта зависимость справедлива при количестве наполнителя $\varphi \leq \varphi_m$.

При $\varphi > \varphi_m$ наполненная система характеризуется недостатком полимерного связующего, необходимого для формирования двухфазной структуры. В такой системе образуются дефекты в виде воздушных пузырьков, нарушения связей на границе контакта частиц, а сами частицы наполнителя контактируют друг с другом. Если в точках контакта имеются относительные касательные смещения, значит, касательные напряжения достигают величины произведения давления на коэффициент трения. Такие точки образуют области проскальзывания. В результате этого в материале возникает дополнительная диссипация энергии, вызванная проскальзыванием частиц наполнителя на поверхности контакта с несовершенными связями.

При деформировании наполненного полимерного композита на определенной частоте коэффициент потерь энергии на несовершенных связях будет равен коэффициенту потерь полимерного связующего $\frac{\eta_{BT}}{\omega} \approx \eta_m$, так как в зоне проскальзывания частиц имеется полимерное связующее и проскальзывание наполнителя происходит по полимеру. Тогда выражение для определения коэффициента потерь наполненного композита примет вид:

$$\eta_{н.с.} = \eta_m(1 + n)$$

Таким образом, для получения вибропоглощающих материалов необходимо применять полимерное связующее (матрицу), обладающее хорошими диссипативными свойствами, а наполнитель должен иметь слоистые структуры, развитую поверхность и количество его должно быть максимально возможным.

1. Липатов, Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. — М.: Химия, 1977. — 304 с
2. Соломатов, В.И. Топологическая оценка эффективности наполнения полимерных композитов / В.И. Соломатов, А.Н. Бобрышев и др. // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1987. № 4. С. 43—48.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВИБРОПОГЛОШАЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.У. Улмасов, С.С. Жовлиев, А.Р. Сатторов

Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт» Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

В процессе динамического нагружения полимерные материалы, особенно композиции на их основе подвергаются значительному разогреву, т.е. поглощенная часть потенциальной энергии колебаний превращается в тепло.

Большая чувствительность прочностных, в том числе вязкоупругих свойств полимерных композиций к температуре ведет к тому, что само разогрев значительно снижает долговечность композиций.

Кроме вязкоупругих свойств и ударной прочности, к вибропоглощающим материалам предъявляются также определенные требования по физико-механическим свойствам покрытий, а именно, адгезионной прочности σ_A и микротвердости. Известно [1], что характер адгезионного взаимодействия и прочности адгезионного соединения определяется адсорбционными процессами, протекающими на поверхности раздела полимер — подложка.

Основное отличие адсорбции полимеров от адсорбции низкомолекулярных веществ состоит в том, что, вследствие большой молекулярной массы адсорбируемых молекул, с поверхностью адсорбента в большинстве случаев связывается только относительно небольшая часть сегментов макромолекул, в то время как ее большая часть простирается от поверхности в полимер и не связана адсорбционными силами с поверхностью.

Данные, представленные на рис.1, также полностью подтверждают вышесказанные предположения. Видно, что с увеличением количества наполнителей минерального происхождения до 20 м.ч., наблюдается некоторый рост σ_A эпоксидной композиции на основе олигомера ЭД-16. Дальнейшее увеличение содержания наполнителей вызывает резкое снижение σ_A композиций. Следует отметить, что добавление в эпоксидный полимер одинарного наполнителя резинового порошка в любом количестве способствует уменьшению σ_A композиций.

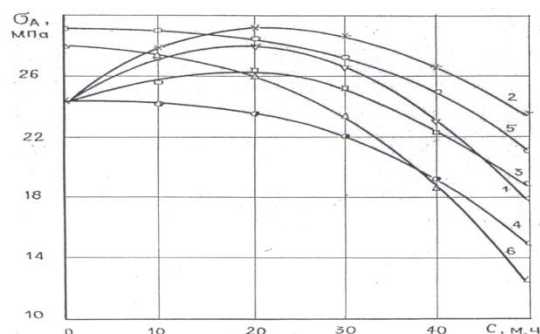


Рис. 1. Зависимость адгезионной прочности композиции на основе олигомера ЭД-16 от содержания одинарных и минеральных дисперсных наполнителей. 1 — Графит; 2 — каолин; 3 — тальк; 4 — РП; 5 — каолин-20+РП; 6 — РП+Графит-20

Увеличение σ_A композиции при наполнении дисперсными наполнителями до 20 м.ч. обусловлено влиянием высокой поверхностной энергии минеральных наполнителей на процессы структурирования связующего. Частицы наполнителей служат активными центрами гелеобразования, и при этом ускоряется образование сетчатой структуры.

Экспериментальные исследования показали, что характер изменения микротвердости эпоксидных композиций не отличается от характера изменения σ_A композиций, наполненных органоминеральными и полимерными наполнителями.

Таким образом, установлено, что органоминеральные наполнители до определенного соотношения (18—22 м.ч.) увеличивает адгезионную прочность и микротвердости, полимерный наполнитель — резиновый порошок уменьшает этих показателей эпоксидных композиций во всем диапазоне соотношений.

1. Л.П. Грабой, Л.П. Ленская, А.Р. Чудновский. Об определении коэффициента теплопроводности графитопластов на основе эпоксидных смол. «Пластические массы», №3. 1965.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСИ ПОЛИОЛЕФИНОВ И ДИСПЕРСНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

А.В. Шаповалов, С.Ф. Мельников

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

Введение.

В настоящее время разработка ресурсосберегающих технологий, в частности, на основе вторичных полиолефинов и лигноцеллюлозных отходов является одним из приоритетных направлений в современном материаловедении. Рациональное использование промышленных отходов механической и химической переработки древесины является основой создания безотходного технологического производства, повышает его экономическую эффективность, увеличивает выход товарной продукции, а также способствует охране окружающей среды.

Цель.

Проведение исследований по разработке композиционного материала на основе измельченной древесины и смеси полиэтилена и полипропилена.

Результаты исследований и их обсуждение.

Показано, что бинарное связующее полиэтилен — полипропилен обеспечивает взаимную нейтрализацию процессов усадки полимеров и вязкоупругую деформацию древесины. Однако, введение полиэтилена в полипропилен способствует их расслоению (фибриляции) в композиции, в особенности, при повышенных и длительных нагрузках. Поэтому для устранения этого недостатка предложено вводить в композит малеиновый ангидрид, который обеспечивает усиление взаимодействия полипропилена и полиэтилена в смеси, а также способствует повышению адгезионного контакта бинарного связующего с древесиной посредством активизации в ней гидроксильных групп, что в целом приводит к формированию более однородной структуры композита, а соответственно, к повышению его ударной вязкости и снижению водопоглощения. Содержание малеинового ангидрида в композиции менее 1 мас.% не приводит к повышению ударной вязкости, а содержание более 3 мас.% практически не способствует дальнейшему повышению ударной прочности и снижению водопоглощения. Кроме того, наблюдается возрастание коэффициента трения композита.

Введение в композит полиэтиленового воска

совместно с минеральным маслом обеспечивает более равномерное распределение масла по поверхности измельченной древесины без значительного его углубления в древесину вследствие загущения масла воском. Это положительно сказывается на армирующих свойствах древесных частиц, также способствуя повышению ударной прочности. В значительной степени этому способствует предварительная обработка древесины 0,1-% раствором NaOH. Модифицированные таким образом частицы древесины проявляют в композиции эффект самосмазывания, создавая смазочный слой с высокими механическими свойствами. Содержание полиэтиленового воска в пределах 0,5-1,5 мас.% обусловлено получением стабильных триботехнических характеристик образцов. С целью придания композиту трибостойкости при длительной его в работе в узлах трения эффективно введение в него частиц золы-уноса (отходы сжигания в тепловых станциях) в количестве 3-7 мас.%.

В результате этого достигается реализация механизма стабильного трения в паре композит-сталь, обусловленный возможностью отвода избыточного тепла с поверхности трения частицами золы-уноса, которые аккумулируя тепло, равномерно распределяют его в массе композита с последующим отводом тепла в воздушное пространство. При этом достигается повышение разрушающего напряжения при растяжении у разработанного материала на 18—20%, коэффициент трения характеризуется стабильностью, а трибостойкость повышается на 18—20%.

Таким образом, применение в древеснополимерном композите смесей полиолефинов в присутствии функциональных добавок обеспечило возможность формирования композитов с более высокой степенью наполнения и повышенным уровнем физико-механических характеристик в сравнении с исходными композитами. Полученные композиционные материалы могут быть использованы при формировании изделий машиностроительного и строительного назначения.

ДРЕВЕСНОПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО И БЫТОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.М. Шаповалов¹, С.Ф. Мельников¹, Р.С. Напреев², М.Л. Соловьев³

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

²ОДО "Полидрев", Гомель, Беларусь

³ООО "Белань плюс", Гомель, Беларусь

Эффективность древеснополимерных композитов (ДПК) определяется возможностью совместить в них свойства дерева и пластика, компенсировав недостатки натуральной древесины. Одним из актуальных направлений в полимерном материаловедении представляется разработка ДПК, предназначенных для производства погонажных изделий методом экструзии и содержащих в качестве полимерной основы термопласты. В то же время несмотря на ряд достоинств таких композитов (возможность эксплуатации в условиях воздействия внешней среды без лакокрасочного покрытия, создание в интерьере любых радиусных и гнутых форм и др.) к их недостаткам следует отнести высокую стоимость изделий. Одним из направлений при решении данной задачи представляется разработка новых ДПК на основе вторичных термопластов, в том числе, древеснонаполненных.

Достижение поставленной цели возможно путем создания составов и технологии переработки экструзионных ДПК на основе отходов древесины и термопластичных полимеров, в том числе вторичных, посредством целевого модифицирования ДПК за счет введения в их состав полифункциональных добавок, позволяющих повысить технологическую совместимость древесных частиц и полимеров, обеспечив тем самым, формирование материалов с улучшенным комплексом свойств.

Предварительные исследования, проведенные на листовых отходах ОДО «Полидрев» (древеснонаполненного полипропилена «Кодренален», АБС-пластика и ПЭНД) показали перспективность их совмещения в экструзионные композиции для изго-

товления погонажных изделий. Прочностные характеристики некоторых композиций не отличались от первичных ДПК на основе полиэтилена и поливинилхлорида, широко представленных на европейском рынке. Поэтому, композиции на его основе найдут применение в производстве конструктивных элементов для устройства декинга и транспортных поддонов.

При производстве декоративных элементов особое внимание будет уделено разработке ДПК с высокой атмосферостойкостью. Последнее планируется достичь путем предварительной обработки древесной муки различными модификаторами, в том числе, изоцианатами.

Перспективы применения изделий из ДПК достаточно широки, особенно в ландшафтном строительстве и архитектуре. Их можно использовать в обустройстве открытых террас, экологических тропинок в заповедных местах, лодочных причалов и купален на озерах и реках, скамеек, ограждений, шезлонгов, лежаков и т. п. Использование профиля из ЛПК для создания декоративных решётчатых конструкций, беседок, навесов и многих других малых архитектурных форм позволит оживить интерьеры мест отдыха.

Особое внимание будет уделено экологической безопасности разрабатываемых ДПК для достойной конкуренции на европейском рынке, а также снижению себестоимости изделий из ДПК путем использования местных источников древесного наполнителя (муки) и введения в композит вторичных термопластов.

РЕЦИКЛИНГ ПОЛИМЕРОВ

В.М. Шаповалов¹, С.Г. Кудян¹, В.И. Ткачев², З.Л. Тартаковский³¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь²КУП "Спецкоммунтранс", Гомель, Беларусь³Институт инженерных материалов Западно-Померанского технологического университета, Щецин, Польша

Одним из приоритетных направлений в современном материаловедении является разработка многокомпонентных полимерных систем на основе полимерных отходов. Особенно остро стоит проблема рециклинга и утилизации полимерных отходов, образуемых в твердых коммунальных отходах, значительная часть которых во многих странах используется незначительно. В то же время, учитывая важность этой проблемы для будущих поколений в странах Европы ее решению уделяется большое внимание. Так в Германии в настоящее время рециклингу подвергается порядка 80–90% полимерных отходов, во Франции 40—50%, в Польше 25—35%, в России 15—20%, а в Республике Беларусь перерабатывается порядка 10—15%. Отсутствие продуманных действий по утилизации и рециклингу полимеров как правило приводит к необходимости их захоронения, что создает предпосылки для образования экологических проблем. Поэтому разработка рециклинговых технологий будет решать вопросы охраны окружающей среды и увеличивать объемы вторичной переработки полимерных материалов, обеспечивая экономии первичного *полимерного сырья*.

Одним из путей увеличения жизненного цикла вторичных полимеров является использование комплексных модификаторов, способных инициировать повышенный уровень эксплуатационных свойств вторичного полимера как в процессе переработки, так и при его эксплуатации в изделии. Создание такого рода материалов в Беларуси находится на начальной стадии и связано это в основном с отсутствием отечественных стабилизирующих добавок. Использование зарубежных добавок требует существенных валютных средств, что не соответствует приоритетным направлениям государства в импортозамещающей политике. Поэтому получение высококачественного продукта с использованием полимерных отходов становится главной задачей при создании рециклинговых технологий, так как их использование позволяет получать новые материалы с заданным комплексом стабильных эксплуатационных свойств и обеспечивает возможность наиболее рационального их применения в промышленности.

Основой такого подхода является их подготовка, определяющая оптимальную реализацию процессов сортировки, измельчения, мойки, агломерации и гранулирования полимерных отходов, обеспечивая получение наилучших результатов при формировании изделий машиностроительного, строительного и иного назначения. При этом получение конечного продукта с высокими потребительскими свойствами во многом будет зависеть и от улучшения его эксплуатационных характеристик, которые, в свою очередь, определяются свойствами вторичного полимерного сырья. Поэтому вопросы модифицирования полимерных отходов представляются важным аспектом при реализации рециклинговых технологий. Среди наполнителей чаще всего используются тальк, каолин, древесная мука и мел. Наполнители повышают модуль упругости, твердость материала, формоустойчивость изделий при воздействии на них тепла, однако при этом способствуют снижению прочности при растяжении, ударной вязкости и относительного удлинения при разрыве. Как правило наполнители ухудшают перерабатываемость полимеров, вследствие снижения их текучести. В то же время при наполнении рециклятов возможно улучшение их эксплуатационных характеристик, что способствует перспективности такого направления в рециклинге полимеров.

Таким образом, эффективность рециклинга полимерных материалов связана с разработкой новых функциональных добавок, обеспечивающих совместимость полимерных отходов в композиционной системе, что позволит создавать на их основе новые перспективные композиционные материалы. В совокупности с новыми типами оборудования для рециклинга полимерных материалов будут созданы условия для эффективной утилизации полимерных отходов и получение на их основе, качественной продукции с привлекательной для потребителя ценой. Важно, что такой подход будет способствовать сохранению первичного полимерного сырья и уменьшать для этого использование нефтяного углеводородного сырья.

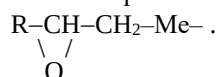
РАЗРАБОТКА МУЛЬТИГИБРИДНЫХ СИЛИКАТОРГАНИЧЕСКИХ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВИ.И. Злотников¹, В.М. Шаповалов²¹Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь; z_ai@tut.by²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Одним из перспективных направлений в создании новых поколений полимерных композиционных материалов является синтез наполнителей и модификаторов с уникальными свойствами. В частности, большое внимание уделяется разработке мультигибридных наполнителей, которые представляют собой систему, состоящую из полидисперсных частиц различной природы. Такие наполнители обладают высоким физико-химическим сродством к полимерной матрице и в то же время выполняют функцию жесткого абразивостойкого минерального наполнителя.

Цель работы — разработка мультигибридного силикаторганического наполнителя и исследование его влияния на физико-механические свойства полиамида.

Материалы и методы. При синтезе наполнителя водорастворимый алифатический эпоксидный олигомер марки ДЭГ-1 вводили в водный раствор силиката натрия в количестве 10 мас.%. Полученный бинарный органно-неорганический раствор коагулировали водным раствором солей поливалентных металлов: хлорид железа (FeCl_3), хлорид меди (CuCl_2), хлорид алюминия (AlCl_3). Использование солей одной кислоты позволяет более достоверно проследить влияние природы металла на свойства готового наполнителя. После завершения процесса золь-гель перехода, осажденный продукт промывали, сушили путем нагрева токами СВЧ и диспергировали.

Результаты и их обсуждение. Исследования полученного продукта показали, что его можно рассматривать как органносиликатную микрогетерогенную систему, в которой кластеры аморфного диоксида кремния (SiO_2) различного размера внедрены в более крупные частицы эпоксидного олигомера. При этом ионы поливалентных металлов оказываются имплантированными как в структуру SiO_2 с образованием соответствующих металлосиликатных соединений общей формулы $\text{MeO} \cdot n\text{SiO}_2$, так и в макромолекулы эпоксидного олигомера с образованием металлоорганических соединений типа:



Последнее приводит к тому, что в ИК-спектрах полученного наполнителя наблюдается появление интенсивных полос поглощения в области $1560\text{--}1640\text{ см}^{-1}$, характерных для металлосодержащих соединений типа солей карбоновых кислот и комплексов металлов.

Тонкодисперсные металлоэпоксисиликатные

наполнители (МЭСН) с размером частиц не более 40 мкм вводили в полиамид 6 (ПА6). Образцы для исследования изготавливали экструзией. На рис. 1 приведена зависимость разрушающего напряжения при растяжении ПА6 от типа и содержания МЭСН.

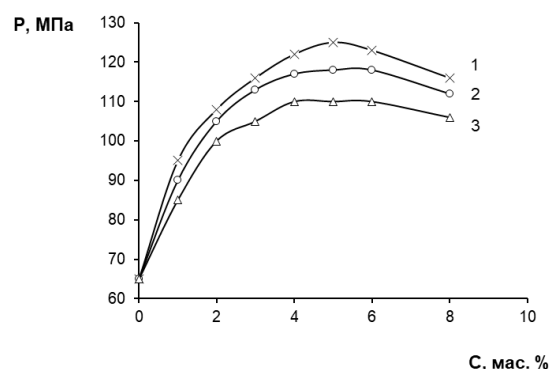


Рис. 1. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении ПА6 от содержания МЭСН с использованием модифицирующих ионов 1 — железа, 2 — меди, 3 — алюминия

Как следует из приведенных данных МЭСН модифицированный ионами железа способствует наибольшему увеличению механической прочности ПА6. Влияние данного МЭСН на свойства ПА 6 в сравнении со стандартным диоксидом кремния иллюстрируют данные приведенные в табл.1.

Таблица 1. Влияние МЭСН на свойства ПА6

Характеристика	ПА6	ПА6 + 5 мас.% МЭСН	ПА6 + 5 мас.% SiO_2
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	65	118	92
Водопоглощение за 48 ч, %	4,2	1,8	3,5
Температура начала плавления, °С	218	228	225
Температура начала потери массы, °С	359	378	364

Как следует из представленных данных введение разработанного наполнителя в полимерную матрицу позволяет увеличивать механическую прочность, термостойкость и значительно снижать водопоглощение получаемого композиционного материала. Это позволяет расширять эксплуатационные возможности ПА6 и применять его для разработки деталей механизмов, работающих в условиях повышенных температур, механических нагрузок и влажности, в частности при воздействии атмосферных факторов.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ОБЛЕГЧЕННЫХ СЭНДВИЧЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ — КОМПОНЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ СПОРТИВНОГО ИНВЕНТАРЯ

В.М. Шаповалов¹, С.В. Зотов¹, А.Я. Григорьев¹, А.П. Ласковнев²

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

²Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Основным требованием к изделиям спортивного инвентаря является сочетание их прочности и малого веса. Конструкционное исполнение беговых лыж обычно предполагает формирование сэндвичевых древесно-полимерных структур, важнейшим элементом которых является сердечник, обеспечивающий жесткость, вес и способность к поглощению вибраций. Современный уровень технологии формирования лыжного сердечника предполагает отход от традиционных вариантов, основанных на использовании цельной древесины.

Цель работы: проанализировать перспективы создания новых технических решений по формированию облегченных лыжных сердечников.

Материалы и методы: патентно-информационный поиск, изготовление модельных конструкций в лабораторных условиях.

Результаты и их обсуждение. В настоящее время мировой тренд в производстве пластиковых лыж заключается в формировании композитных сердечников. Последние выполнены из сочетаний конструкционных материалов, скрепленных между собой теми или иными методами. Ставится задача: без ущерба для прочностных характеристик добиться снижения веса лыжи в целом. Наиболее распространенные варианты:

- формирование воздушных каналов в цельном сердечнике (технологии Air Core, Air Channel, разработчик и изготовитель фирма Fischer);

- изготовление сердечников из пористых полимерных материалов (технологии Rohacell, Densolite, фирмы и марки Karhu, Madshus, Peltonen, STC), преимущественно — вспененных полимеров (полиуретаны, полиакрилаты) с достаточной жесткостью;

- получение наборных сердечников из «брекетов» с пористыми вставками (фирма Fischer);

- формирование «сотовых» сердечников, набранных из полимерных трубок или сотоподобных структур, в том числе пропитанных клеящими составами (технологии Cell Core, фирмы и марки Fischer, Rossignol, STC, KORROYD);

- применение специальных композитных тканей в виде стекловолокна, углеволокна, арамидной ткани (технологии Carbonlite, Carbon Fibre, Air Core D-Frame, фирма Fischer);

- комбинация в одном изделии нескольких

вышеупомянутых вариантов изготовления или заполнения сердечника, что в настоящее время считается наиболее технологичным и результативным подходом с точки зрения оптимального сочетания свойств лыжи (технологии Sandwich Sidewall Construction, Paulownia Wood Core, Carbon-Stringers, Air Tec Ti, Multicore, Nomex Honeycomb, фирмы Fischer, Rossignol, Madshus).

Для оценки перспектив использования отечественных материалов в конструкции лыж разработана конструкция композитного сердечника на основе сочетаний материалов, предположительно обеспечивающих оптимальное соотношение веса и прочности (жесткости). Изготовлены модельные образцы следующих конструкций:

- 1) с использованием деревянных ламелей или фанерных нервюр, установленных вертикально и образующих «стенки» сердечника;

- 2) с использованием высокопористого материала из ряда «пенополиуретан — пенополистирол — акриловая пена — проклеенный мелкоячеистый гофрокартон», являющаяся заполнителем, занимающим пространство между боковыми сторонами лыж;

- 3) в качестве композиционных армирующих элементов использованы препреги на основе стекло- и углеткани и приклеенные к склейке «стенки — наполнитель».

Изготовлена специальная пресс-форма, в которую между ламелей-стенок заливались реагенты, формирующие пенополиуретановую массу, с последующей прецизионной фрезерной обработкой до достижения профиля полноразмерного сердечника.

Результаты предварительных испытаний показали, что модельные конструкции обладают жесткостью на трехосный изгиб, сравнимой с образцами прогулочных лыж, присутствующих на рынке. При этом, достигнуто снижение веса сердечника на 15-20% в сравнении с цельнодеревянным. Наиболее высокие результаты отмечаются при использовании пенополиуретанового заполнителя.

Заключение. Определены основные направления формирования композитных сэндвичевых структур для лыжного сердечника. Способы сочетания компонентов, представляющие собой ноу-хау, могут явиться основой для создания в Беларуси опытного производства композитных беговых лыж.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ ФТОРОПЛАСТОВЫХ КОМПОЗИТОВ

В.А. Шелестова, И.В. Коваль, А.Л. Башлакова

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

Фторопластовые композиты с углеродными наполнителями являются уникальными материалами для подвижных уплотнений компрессорного и насосного оборудования, шаровой запорной арматуры. Они сочетают в себе исключительную химическую стойкость, высокую термостойкость, отличные уплотнительные свойства, низкий коэффициент трения. Их недостатком является высокий коэффициент термического расширения. Коэффициент расширения политетрафторэтилена (ПТФЭ, Ф-4) имеет сложную зависимость от температуры, резко увеличиваясь в области фазовых переходов, соответствующих перестройке кристаллической решетки (19–30 °C) [1]. Эта область температур соответствует комнатным температурам, при которых происходит изготовление деталей из фторопластовых композитов, что приводит зачастую к ошибкам при определении размеров и допусков. В литературе недостаточно сведений о поведении фторопластовых композитов при тепловом расширении, что определяет необходимость изучения этого вопроса.

Цель работы — изучение влияния содержания измельченных углеродных волокон (УВ) на коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) фторопластовых композитов.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись композиты на основе Ф-4 марки ПН 90 по ГОСТ 10007-80 и измельченных УВ марки Белум по ТУ ВУ 400084698.177-2006 (с фторполимерным покрытием). Доля УВ варьировалась от 1 до 40 мас. %.

Композиты получали методом холодного прессования и последующего спекания в виде цилиндрических заготовок, из которых вытачивали исследуемые образцы высотой 20 и диаметром 5 мм вдоль и поперек направления прессования.

КТЛР определяли с помощью dilatометра DIL 801L (TA Instruments, Германия) в температурном интервале –10...+250 °C.

Результаты и обсуждение. Температурные зависимости КТЛР для образцов композитов имели характерный вид, отличающийся резким подъемом КТЛР в области фазового перехода (19–30 °C) и анизотропией композитов, проявляющейся в значительном отличии (в 1,5 раза) КТЛР для образцов вдоль и поперек направления прессования.

Для определения влияния доли УВ на КТЛР выбраны его значения при температуре 100 °C и результаты представлены на рис. 1.

Для образцов вдоль направления прессования зависимость КТЛР от доли УВ имеет экстремальный характер, при небольших степенях наполнения (до 7 мас. %) КТЛР растет, затем снижается более резко, чем по простому правилу смеси. Подобное явление характерно для ПТФЭ с дисперсными неорганиче-

скими наполнителями, к которым отсутствует адгезия полимерной матрицы [2]. Согласно правилу смеси, которое выполняется тогда, когда каждая фаза расширяется независимо от другой, КТЛР (γ_c) оценивается с помощью различных формул смешения, простейшей из которых является линейная (1).

$$\gamma_c = \gamma_m \varphi_m + \gamma_p \varphi_p, \quad (1)$$

где φ_m и φ_p — объемные доли фаз.

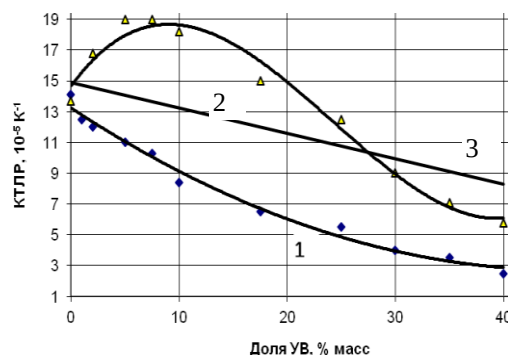


Рис. 1. Зависимость КТЛР композита из ПТФЭ от доли УВ. 1 — поперек направления прессования; 2 — вдоль направления прессования; 3 — простое правило смеси.

Для образцов поперек направления прессования характерно снижение КТЛР с увеличением доли УВ, что соответствует известным представлениям о влиянии наполнителя, имеющего адгезионную связь с матрицей.

По-видимому, причина этих различий кроется в анизотропии композита, возникающей при прессовании, а также в повышении адгезионной способности к ПТФЭ волокон с фторполимерным покрытием. При прессовании часть УВ, расположенных вдоль направления приложения силы, ломается или укладывается поперек. Таким образом, поперек направления прессования оказывается больше длинных УВ, а вдоль — более коротких, сломанных. Короткие волокна приблизительно можно трактовать как дисперсные наполнители и для них выполняется установленная в [2] закономерность. Более длинные поперечные УВ Белум обладают адгезией к ПТФЭ за счет фторполимерного покрытия, что повышает их сцепление с матрицей, приводящее к снижению КТЛР поперек направления прессования на всем интервале изменения массовой доли УВ.

1. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. — Л.: Химия, 1978. 230 с.
2. Промышленные полимерные композиционные материалы. Под ред. М. Ричардсона. — М.: Химия, 1980, 471 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ РФЭС ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ПОСЛЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В.А. Шелестова, В.М. Макаренко, П.Н. Гракович

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

Углеродные волокна (УВ) применяются в качестве наполнителя ПТФЭ, а промежуточный фторполимерный слой на их поверхности улучшает адгезионное взаимодействие с полимерной матрицей и, как следствие, структуру и свойства композита.

Методом нанесения нанослоя фторполимера на поверхность является плазмохимическая обработка (ПХО) в среде фторсодержащих газов при пониженном давлении, в процессе которой на поверхности углеродных волокон полимеризуется покрытие, близкое по составу к ПТФЭ [1]. Атомы и ионы фтора в плазмообразующем газе также воздействуют на поверхность, приводя к травлению, а остаточный кислород воздуха может участвовать в процессах окисления. Плазмохимические процессы при обработке углеродных материалов достаточно многообразны и зависят от начального состояния поверхности волокон.

Цель работы — изучение влияния исходного окисления поверхности углеродных волокон в составе тканей на интенсивность плазмохимического нанесения фторполимерного покрытия и его состав.

Материалы и методы.

Объектами исследования являлись углеродные ткани (УТ) марки ЛО-1-12Н и ТР 3/2-15 ЭХО.

ЭХО — электрохимическая обработка с целью окисления поверхности УТ.

Углеродные ткани обработаны в плазме высокочастотного электрического разряда при пониженном давлении в среде октафторциклобутана (ОФЦБ) по методике [1].

РФЭС-исследование поверхности углеродной ткани проводилось на фотоэлектронном спектрометре ЭС2401. Спектры обработаны по методике [2].

Результаты и обсуждение.

По обзорным спектрам определено относительное содержание элементов в поверхностном слое УВ (Табл.1).

Таблица 1. Содержание элементов (%) на поверхности углеродных тканей по обзорным спектрам РФЭС.

№ пп	Образец УТ	C	O	F	другие
1	ТР 3/2-15 ЭХО	83	17	-	-
2	ТР 3/2-15 ЭХО ПХО 1 мин	66	23	4	7 (Si)
3	ЛО-1-12Н ПХО 0,5 мин	68,3	15,2	7,6	8,9 (Na)
4	ЛО-1-12Н ПХО 1 мин	80,3	10,4	9,4	-
5	ЛО-1-12Н ПХО 3 мин	74,8	10,0	15,2	-

Содержание атомов кислорода на поверхности

образца УТ с ЭХО (№ 1) выше, чем у остальных образцов, что закономерно после окислительной обработки. После ПХО (№ 2) доля кислорода еще более увеличивается, появляется 4% атомов фтора (1 мин). Следует отметить меньшее разнообразие кислородсодержащих групп на поверхности УВ, подвергнутых ЭХО, чем в ЛО-1-12Н. Это может быть связано с удалением загрязнений и примесей в результате ЭХО.

Образцы (№ 3-5) из УТ без ЭХО подвергались ПХО в течение нарастающего времени. Содержание фтора растет с увеличением времени ПХО и при 1 мин составляет 9,4%, что превышает долю атомов фтора для образцов предварительно окисленной углеткани в 2 раза. Таким образом, предварительное окисление УВ не способствует образованию фторполимерного покрытия на УВ.

В спектрах высокого разрешения линии F1s содержатся не только полосы, характерные для фторполимера (CF_2 - CF_2 и O-C(O)-CF_3), но и принадлежащие обычно ионам фтора и фторидам [3]. В зависимости от времени ПХО тонкая структура линии фтора изменяется. На ранних стадиях обработки (0,5 мин) в структуре линии F1s влияние фторуглеродных групп незначительно, а преобладают ионные связи фтора (684,5 и 687,2 эВ). По мере увеличения времени формирования покрытия доля фторуглеродных групп (688,5 и 689,7 эВ) увеличивается (1 мин) и становится преобладающей (3 мин). Можно заключить, что ионные связи фтора появляются на поверхности УВ после воздействия атомов и ионов фтора, содержащихся в плазме после деструкции фторсоединений, на атомы примесей (Si, Na). На начальных стадиях ПХО образующееся фторполимерное покрытие не сплошное, островковое, причем очень малой толщины (порядка монослоя), поэтому его вклад в полосу фтора в спектрах РФЭС невелик. Затем покрытие растет, становится сплошным и нивелирует поверхностные ионные связи фтора.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Ляхович А.М. и Рогачеву А.А. за содействие в получении РФЭС-спектров.

- 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.
- Becker O. and Simon G. Epoxy Layered Silicate Nanocomposites // Adv. Polym. Sci. — 2005 (179), 29—82.
- Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений // М.: Химия, 1984, 255 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПТФЭ КОМПОЗИТОВ АРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА

И.С. Шилько

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

Введение. В настоящее время особую роль в широкой гамме выпускаемых полимерных композиций играют угленаполненные антифрикционные композиционные материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), специально разрабатываемые для экстремальных условий эксплуатации высоконагруженных узлов трения машин и оборудования.

Еще до недавнего времени для разработчиков таких материалов стоял острый вопрос об экономической составляющей применения и внедрения в промышленное производство эффективных, но весьма дорогостоящих углеродных волокон (УВ). Однако в связи с расширением мирового производства УВ на основе полиакрилонитрила (ПАН) и их массового вовлечения в различные сферы производства данный вид углеродного сырья становится значительно доступнее и тем самым порождает повышенный интерес к использованию УВ ПАН для получения антифрикционных ПТФЭ композиций.

При всем многообразии марок угленаполненных фторопластовых композиций представленных на отечественном рынке (материалы «Флубон», Ф4УВ15/20, «Флувис», «BARS» и др.), у производителей данных материалов сложилась парадигма, основанная на использовании высокоэффективных, но дорогостоящих и дефицитных низко модульных вискозных углеродных волокон. В то же время, современные рыночные условия указывают на необходимость поиска новых типов углеродных наполнителей для ПТФЭ композиций с оптимальным соотношением параметра «цена-качество».

Цель — разработать и изучить композиционные материалы антифрикционного назначения на основе ПТФЭ и высокопрочных УВ ПАН, провести сравнительный анализ физико-механических и триботехнических свойств полученных композиций с показателями серийно выпускаемых композиционных фторопластовых материалов наполненных вискозными УВ.

Материалы и методы исследований. Объектами исследования являлись полимерные композиционные материалы на основе фторопласта-4 марки ПН-90 (ГОСТ 10007–80), армированные УВ ПАН в количестве 20 мас.%. В качестве наполнителя использованы измельченные высокопрочные (модуль упругости при растяжении 220–250 ГПа, прочность при растяжении 3200–3800 МПа) серийно выпускаемые ПАН углеродные волокна производства

компаний «UMATEX» (Российская Федерация), и «Toray» (Япония) со средней длиной 50–100 мкм.

Механические испытания образцов проводились на универсальной испытательной машине Instron 5567 в соответствии с действующими стандартами. Триботехнические характеристики композиционных материалов изучали на машине трения 2070 СМТ-1 при трении скольжения без смазочного материала по схеме трения ролик-вкладыш.

Результаты и обсуждение. В результате проведенных исследований деформационно-прочностных свойств полученные ПТФЭ композиции на основе УВ ПАН показали характеристики соответствующим заявленным в требованиях НД на серийно выпускаемые антифрикционные композиции с добавлением вискозных углеродных волокон имеющих содержание УВ на уровне 20 мас.%, а по показателям прочности и модуля упругости при сжатии превосходили материалы-аналоги на основе вискозных УВ. Установлено, что по триботехническим характеристикам (коэффициент трения, PV-фактор, интенсивность изнашивания) композиции на основе УВ ПАН уступают аналогам. Выявлено, что для композиций с УВ ПАН температура в зоне трения растет с повышением давления, в то время как для материалов с вискозным углеродным наполнителем температура в зоне трения почти не меняется с ростом давления, а наблюдаемые колебания не носят системного характера. Это обуславливается большим выделением тепла, связанным с высоким модулем упругости УВ ПАН и приводит к преждевременной деформации образца.

Таким образом, несмотря на соответствие физико-механических характеристик получаемых ПТФЭ композиций с добавлением УВ ПАН уровню большинства серийно выпускаемых фторопластовых композиционных материалов с вискозным углеродным наполнителем установлено, что применение высокопрочных УВ ПАН приводит к заметному снижению триботехнических свойств, включая повышенные коэффициенты трения, интенсивность изнашивания и пониженную несущую способность материала в узле трения. Однако учитывая доступность и значительно более низкую стоимость, промышленные высокопрочные марки ПАН УВ имеют хорошие перспективы для их массового применения в качестве наполнителя фторопластовых композиционных материалов.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

В.Ю. Шумская¹, В.И. Жукалов²

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

²Гомельский филиал университета гражданской защиты МЧС Беларуси, Гомель, Беларусь; jukalov@mail.ru

Введение. Одним из эффективных методов ликвидации последствий разливов нефти и нефтепродуктов является применение специальных сорбционных материалов. Нетканый волокнисто-пористый материал из полипропилена обладает высокой сорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам, что обусловлено физико-химическим сродством полипропилена к углеводородам. Увеличение сорбционной способности волокнисто-пористых материалов путем модифицирования различными методами является актуальной задачей.

Цель. Изучение влияния модифицирования волокнисто-пористых материалов из полипропилена и их поровой структуры на сорбционные свойства к углеводородам.

Материалы. В работе исследованы следующие образцы волокнисто-пористого материала: исходные, полученные из гранулированного полипропилена марки Borealis на пневмоэкструзионной установке; модифицированные на стадии диспергирования расплава в отрицательном и положительном поле коронного разряда с напряженностью 25 кВ/см; обработанные в низкотемпературной кислородной плазме тлеющего разряда с частотой 35 кГц. В качестве сорбирующей жидкости использовалось дизельное топливо марки ДТ-Л-К5.

Методики. Для изучения сорбционной и удерживающей способности волокнисто-пористых материалов образец размерами 110x20x15 мм выдерживали в течение 10 минут в емкости с дизельным топливом для заполнения пор образца и удаления пузырьков воздуха. Заполненный топливом образец подвешивали на штативе 2, установленном на весах 3, соединенных с компьютером (рис. 1).

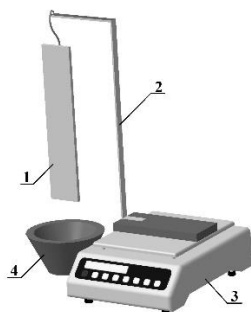


Рис. 1. Схема испытательного стенда: 1 — испытываемый образец материала 2 — штатив; 3 — электронные весы, подключённые к компьютеру; 4 — емкость с дизельным топливом;

Текущую массу образца, измеряемую весами, фиксировали с помощью специализированного про-

граммного обеспечения и записывали в файл. Далее проводили математическую обработку полученных данных.

Изучение поровой структуры проводили методом растровой электронной микроскопии на микроскопе VEGA II LSH Tescan.

Результаты. При изучении пористой структуры образцов волокнисто-пористых материалов было установлено наличие открытой мелкопористой структуры, способствующей эффективной сорбции углеводородов за счет проявления капиллярного эффекта.

Влияние модифицирования полимерных волокнисто-пористых материалов на сорбционные свойства показано на рис. 2.

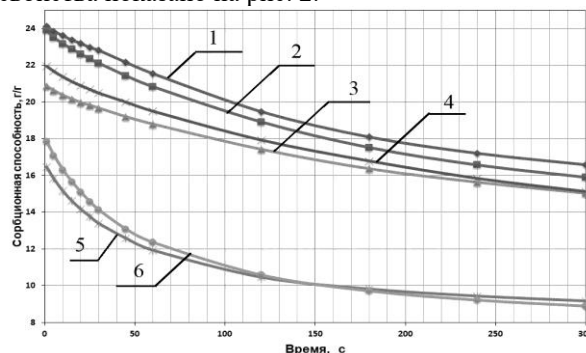


Рис. 2. Сорбционная способность образцов во времени: 1 — образец, сформированный в поле отрицательного разряда; 2 — образец, сформированный в поле отрицательного разряда и обработанный в плазме; 3 — образец, сформированный в поле положительного разряда; 4 — образец, сформированный в поле положительного разряда и обработанный в плазме; 5 — исходный волокнисто-пористый материал; 6 — исходный волокнисто-пористый материал, обработанный в плазме.

Из графиков видно, что лучшей сорбционной и удерживающей способностью к дизельному топливу обладает образец полимерного волокнисто-пористого материала № 1, полученный в поле отрицательного коронного разряда, а дополнительная обработка в низкотемпературной плазме не влияет на увеличение этих свойств.

Таким образом, метод модифицирования волокнисто-пористых материалов в поле отрицательного коронного разряда является предпочтительным при изготовлении сорбционных материалов. Выявленные закономерности обрисовывают перспективу повышения эффективности полимерных волокнисто-пористых материалов в качестве сорбентов нефти и нефтепродуктов.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СИСТЕМ ФИЛЬТРАЦИИ

В.Ю. Шумская¹, Л.А. Калинин¹, Л.Ф. Иванов¹, В.В. Снежков²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,
viktoriya-shumsk@mail.ru

²ОДО НТЦ «Ларта», Гомель, Беларусь

Введение. В современных производствах важное место занимают процессы разделения газ-жидкость. В результате фильтрации, жидкость накапливается в порах фильтра и при достижении определенного уровня начинает вытекать, т.е. фильтр переходит в режим самоочистки. Понимание этих процессов важно для расчета систем очистки — площадь фильтрации, перепад давления на фильтре и т.д. В большинстве фильтровальных элементов для улавливания жидкой фазы и дренажа (стекания) собранной жидкости используют слои, изготовленные из различных волокнисто-пористых материалов (ВПМ) и имеющие разную поровую структуру. Поэтому актуальной научно-прикладной задачей является разработка и изучение новых пористых полимерных материалов и многослойных конструкций из них для эффективной очистки многофазных сред: газ-жидкая фаза.

Цель. Изучение влияния структуры полимерных ВПМ на эффективность улавливания частиц аэрозоля и их самоочистку от жидкой фазы, а также совершенствование расчетной модели процесса самоочистки, учитывающей особенности ВПМ.

Материалы. Объектом исследований являлись полимерные ВПМ: волокнисто-пористый изотактический полипропилен различных марок: изготовленный по технологии «melt blown» (ПП1 — СКТБ «Металлополимер», ПП2, ФВП, МВ-11, МК-11 — ОДО «Ларта»); иглопробивной материал Филарс из арселона (ОАО «СветлогорскХимволокно»), Грифтекс — волокнисто-пористый политетрафторэтилен (ПТФЭ) (ИММС НАН Беларуси), полученный методом лазерной абляции в вакууме, непористая пленка из ПТФЭ, стеклбумага марки Н13. В качестве фильтруемых жидкостей использовали масла: нефтяное турбинное марки ТП-22, вакуумное ВМ-4 и индустриальное И-20.

Методики. Изучение поровой структуры проводилось методом растровой электронной микроскопии на микроскопе VEGA II LSH Tescan.

Изучение влияния структуры полимерных ВПМ на их самоочистку от жидкой фазы проводили по методике, которая заключается в автоматической регистрации массы стекающей жидкости из пористого образца, представляющего собой вертикально расположенную прямоугольную пластину из исследуемого материала, предварительно пропитанную жидкостью. Математическую обработку полученных данных проводили на основе теоретической модели.

Изучение эффективности улавливания частиц

аэрозоля проводили на стенде. Принцип работы, которого основан на прохождении аэрозоля, образующегося при воздействии ультразвукового генератора на жидкую среду, через ячейку с исследуемым образцом и регистрации размера и количества частиц, прошедших через фильтрующий элемент (ФЭ). Определялось количество отсеченной жидкости. Образец представляет собой пористую систему, состоящую из различных функциональных слоев.

Результаты. При изучении поровой структуры ВПМ, была установлена поверхностная пористость, средний размер пор, диаметр волокон.

Установлено, что самоочистка от жидкой фазы по вертикально расположенному образцу из ВПМ представляет собой сложную комбинацию стекания по внешней поверхности пластины и фильтрация в ее внутренних слоях. Разработанная теоретическая модель, рассматривающая эти процессы в аддитивном приближении, позволяет связать экспериментально наблюдаемые величины (уменьшение массы жидкости в образце со временем) с эффективными характеристиками ВПМ (проницаемость пористой среды), жидкости (эффективная вязкость) и системы как целого (коэффициент фильтрации). Дополнительный учет капиллярных сил в рамках модели позволяет теоретически оценить высоту «масляной зоны», остающейся в исследуемом образце при длительных временах стекания. Наиболее эффективным фильтрующим материалом из рассмотренных ВПМ является Грифтекс. Многоуровневая структура пор которого обеспечивает практически независимое движение масла на поверхности и внутри пористого образца. Грифтекс также обладает минимальной высотой «масляной зоны» (всего 5-10 мм), что делает процесс фильтрации в реальных фильтроэлементах более эффективным.

Установлено влияние последовательности слоев ВПМ на эффективность улавливания частиц, сопротивление потоку газа, эффективность коалесцирования и дренажа. Наибольшей эффективностью по улавливанию частиц обладают образцы, состоящие из мелкопористых волокнисто-пористых материалов — Грифтекс и стеклбумага.

Таким образом, использование усовершенствованной теоретической модели позволяет подбирать оптимальные комбинации фильтрующих материалов для изготовления фильтрующих элементов, обладающих наилучшими для каждого конкретного технологического процесса величинами ресурса и степени очистки.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА, ПРЕДОТВРАЩАЮЩЕГО САЛЬНИКООБРАЗОВАНИЕ НА ДОЛОТАХ БУРОВОЙ КОЛОННЫ ПРИ БУРЕНИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Б.Ш. Эгамбердиев¹, К.С. Негматова¹, Ж.Н. Негматов²

¹Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараққийёт» Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова,

²Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан

Введение. Как известно, для освоения нефтегазоконденсатных месторождений республики необходимо пробурить несколько миллионов погонных метров разведочноэксплуатационных скважин, что требует соответствующего количества реагентов и буровых растворов [1, 2].

Сальникообразование часто встречается при бурении по глинистым или перемежающимся с песком и гравием глинистым отложениям.

Сальникообразование на долоте проявляется при разбуривании мягких сланцев, особенно вязких глин и набухающих глинистых сланцев, которые адсорбируют воду из бурового раствора. В этом случае сальник из уплотненного сланца может увеличиваться в объеме и покрыть все долото, препятствуя дальнейшему процессу бурения. В этом случае бурильщик вынужден попытаться сбить сальник с долота или поднять неотработанное долото. Для предупреждения образования сальника на долоте вязкие глины часто разбуривают при пониженных осевых нагрузках.

Необходимо отметить, что при бурении скважин, особенно с глинистыми буровыми растворами, на долоте в большинстве случаев образуются сальники (сальник разрушитель), приводящие к снижению механической скорости бурения, повышению износа бурильного инструмента и возникновению прихватов. Все это вместе взятое предъявляет к качеству буровых растворов определенные требования, которые влияют на предупреждение некоторых аварий и осложнений.

Следовательно, на основе вышеприведенного, можно прийти к выводу, что существующие химические реагенты в условиях Узбекистана недостаточно эффективны и сравнительно дороги, особенно в условиях образования сальников на долоте в процессе бурения нефтегазовых скважин.

В связи с этим, основной задачей в настоящее время перед буровиками нефтегазовой промышленности нашей республики является создание технологии получения надёжных и доступных добавок к буровому раствору, являющихся композиционными химическими реагентами, термостойкими и устойчивыми к агрессивному воздействию буровых рас-

творов, препятствующих образованию сальников (сальник разрушитель).

Объектами исследования является недефицитные, доступные и сравнительно дешевые органические и неорганические ингредиенты то есть отходы масложирового производства, получаемые в виде кубового остатка при дистилляции жирных кислот, выделенных из хлопковых соапстоков; недопал — отход химических производств, алюмак — являющийся отходом производства и переработки кусковых цветных металлов, а также некоторые неорганические минеральные ингредиенты. На их основе разработан и получен композиционные химические реагенты добавок и позволяющих препятствование образованию сальников (сальник разрушитель) на долоте. Подробно описание в составе разработанных композиционных химических реагентов приведены в работе [2]. Разработанная нами композиционная химическая реагент-добавка условно названа КХР-Д.

Закключение. Разработанные композиционные реагент-добавки, благодаря хорошему физико-химическому взаимодействию с компонентами, входящими в состав композиций, обеспечивают синергетический эффект и оказывают сильное стабилизирующее действие на свойства буровых растворов, улучшают качество обволакивания из-под долота выбуренной породы и обеспечивают хорошую промывку забоя скважины, не допускают вторичного дробления горной породы и тем самым предотвращает сальника образование на долотах колонны в процессе бурении нефтегазовых скважин и соответственно обеспечивают рост механической скорости бурения и, соответственно, производительности бурения скважин.

1. Негматова К.С. Роль промывочных растворов при бурении нефтегазовых скважин и перспективы развития разработки и применения композиционных химических реагентов для них. — Ташкент: ГУП «Фан ва тараққийёт», 2012. — 58 с.
2. Негматова К.С. Композиционные химические реагенты на основе местного сырья и отходов производств и буровые растворы из них. — Ташкент: Fan va texnologiya, 2013. — 88 с.

БАЗАЛТОПЛАСТИКИ — ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Х. Юсупбеков, С.С. Негматов

Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт» (Наука и Прогресс) Ташкентского Государственного Технического Университета им. И.А.Каримова, Ташкент, Узбекистан

Важнейшим достижением за последние двух десятилетие в области композиционного материаловедения следует отнести создания базальтопластиков как новый класс композиционных материалов.

Композиционные материалы на основе базальтового волокна характеризуются высокой прочностью, твердостью, морозо- и огнестойкостью, благодаря которых становится объектом систематических исследований. Одним из важных направлений использования полимерных композиционных материалов является машиностроение, где основные детали изготавливаются из конструкционных материалов: текстолита, стеклопластика и т.п. В этой связи создание экологически безвредной — безасбестовой технологии получения композиционных полимерных материалов конструкционного назначения представляет важный интерес и позволяет решать актуальных задач, направленную на разработку экспортоориентированной технологии, отвечающей мировым стандартам.

В соответствии вышеизложенным, нами впервые был предложен новый экологически безвредный состав полимерных композиций фрикционного назначения и технология их получения.

Следует отметить, что в случае введения гибкоцепного полимерного связующего (каучука), уменьшается износ фрикционных материалов, в то время как с увеличением содержания жесткоцепного связующего повышается коэффициент трения, но возрастает износ. В целом можно сказать, что коэффициент трения композиции, в зависимости от состава, колеблется в пределах 0,52—0,58 (табл. 1)

Таблица 1. Фрикционные свойства накладок тормозных колодок

Наименование показателей	Значение показателей для:	
	Разработанных накладок	По нормам ТУ 38-114205-84
Твердость по Бринеллю НВ 10/500/30, кгс/мм	15—22	16—29
Коэффициент трения по чугуну Сч 15 (ГОСТ 1412–79)	0,51—0,58	0,44—0,60
Линейный износ по чугуну Сч 15 (ГОСТ 1412–79), мм	0,10—0,12	0,10—0,14

Относительно высокий коэффициент трения полимерных композиции по сравнению с асбестовыми композициями связана как с влиянием природы связующих, так и со структурой базальтового волокна. Следует также заметить, что при введении каучука в состав композиции повышается средний ресурс накладки, т.е. пробег накладки увеличивается

1,5—1,8 раза по сравнению с традиционными накладками и достигает в среднем 50—60 тыс.км.

Таблица 2. Физико-механические свойства фрикционных материалов

Наименование показателей	Наполнители	
	асбест	Базальтовое волокно
Плотность, кг/м ³	2400	2710
Предел прочности при растяжении, МПа	27,4	28,2
Удельная ударная вязкость, кДж/м ²	6—7	8
Тепловая усадка, %	0,63	0,61
Износ по весу, мг/ч	3	1,5
Водопоглощение, %	0,51	0,25

Предложенные фрикционные материалы отличаются от известных составов фрикционных материалов следующими особенностями:

- отсутствие асбеста в качестве армирующего материала;
- использование в качестве армирующего материала теплостойкого базальтового волокна;
- бесшумность;
- доступность и дешевизна.

Накладки тормозных колодок, благодаря особому составу и свойствам композиции, увеличивают пробег автомобиля, обеспечивая надежность и долговечность тормозных систем при больших скоростях, и имеют низкую себестоимость (в 2—3 раза) по сравнению с существующими аналогами и отвечают мировым стандартам.

Надежность и долговечность транспортных средств при использовании разработанных фрикционных материалов достигаются за счет специально-го состава полимерных связующих и ингредиентов, обеспечивающих достаточную прочность связи с каркасом.

Установлено, что наилучший эффект торможения тормозных дисков наблюдается в случае использования полимерных композиции с высокой пластичностью. При этом, к минимуму сводится износ диска и исключается появление задир и царапин на его поверхности. Результаты разработок успешно внедрены в ООО «APATER-ORION» при изготовлении фрикционных материалов: тормозные колодки; диска сцепления и т.п. для различных видов автотранспортных средств, работающие в тяжелозагруженных условиях.

1. Юсупбеков А.Х. и др. Патент РУз IDP 04468-2000.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИТРИФТОРХЛОРЕТИЛЕНА

А.И. Буря, С.В. Калиниченко, Е.А. Ерёмина

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

Введение

Фторполимеры занимают важное место в полимерном мире через свои уникальные свойства: химическая стойкость способствовала их внедрению в атомную и химическую промышленности, высокие электроизоляционные свойства — в электротехнику и электронику, климатические — в строительство. О рентабельности применения изделий из фторполимеров можно судить из многочисленных примеров, однако они долгие годы были закрытыми материалами, из-за чего их свойства почти не изучены. Например, из литературы известно, что температурная история изготовления изделий из фторполимеров значительно влияет на плотность, физико-механические, трибологические и термодинамические свойства. Однако, чтобы найти закономерности влияния технологических параметров формирования на характеристики фторполимеров необходимы системные исследования, поскольку, зная оптимальный режим переработки и закономерности его влияния на свойства полимера, возможно целенаправленно управлять теми или иными характеристиками готового изделия.

Материалы и методы исследований

Ярким представителем фторполимеров, свойства изделий из которого значительно зависят от температурной истории, является фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен) — тонкий порошок белого цвета, состоящий из частиц полимера в виде шариков со средним размером около 200 мкм. Это кристаллический полимер, который вследствие несимметричного строения имеет малую склонность к кристаллизации: 85—90% при медленном охлаждении, и 35—40% при закалке.

Политрифторхлорэтилен формировали в изделия методом компрессионного прессования. Порошкообразный полимер таблетировали при комнатной температуре и давлении 40 МПа. Препреги загружали в пресс-форму, нагретую до 423 К, после чего температуру поднимали до 510—526 К и выдерживали 10 мин. без давления, далее образец нагружали (40 МПа). Для фиксации формы изделие охлаждали под давлением до температуры 480—496 К, после чего его выталкивали из пресс-формы в воду или масло для закалки, или охлаждали на воздухе.

Оптимизацию технологии переработки политрифторхлорэтилена проводили методом математического планирования эксперимента. Параметром оптимизации была выбрана ударная вязкость (a_n),

поскольку она является наиболее чувствительным показателем к изменениям параметров формирования материалов. Определение удельной ударной вязкости выполняли по методу Шарпи (ГОСТ 4647–80) с помощью маятникового копра МК 0,5-1.

Результаты и их обсуждение

Исследуемый процесс рассматривали как функциональную зависимость: $a_n = f(X_1, X_2, X_3)$, где варьируемыми независимыми факторами являются: температура формирования (X_1), температура извлечения материала из пресс-формы (X_2) и среда охлаждения (X_3). Для упрощения расчётов значения дозирок исследуемых факторов преобразовывали в условные единицы и устанавливали таким образом, чтобы при переводе в условный масштаб они соответствовали –1; 0; +1. Результаты расчётов дозирок представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для планирования эксперимента

Параметр	Символ	Шаг	Уровни варьирования				
			+1,68	+1	0	–1	–1,68
Температура формирования	X_1 $T_{\text{ф}}, \text{K}$	5	526	523	518	513	510
Температура извлечения	X_2 $T_{\text{в}}, \text{K}$	5	496	493	488	483	480
Среда охлаждения	X_3		вода	вода	масло	воз- дух	воз- дух

Поставленной цели достигали путём использования рототабельного центрального композиционного планирования эксперимента 2-го порядка типа 3^2 . На основании экспериментальных данных получено следующее математическое описание зависимости исследуемого процесса от температуры формирования и извлечения материала из пресс-формы, а также среды охлаждения:

$$y = 12,4 - 4,43 x_1 + 26,67 x_3 - 7,37 x_1 x_3 - 12 x_2 x_3 - 3,72 x_1 x_2 x_3 + 14,9 x_1 x_1 + 10,6 x_2 x_2 + 13,44 x_3 x_3$$

Анализируя полученную математическую модель в исследуемом диапазоне варьирования факторов видно, что среда охлаждения оказывает наибольшее влияние на ударную вязкость политрифторхлорэтилена. Следует отметить, что максимальных значений ($a_n = 98,05$) параметр оптимизации достигает при следующих режимах переработки: температура переработки — 513 К, извлечения из пресс-формы — 483 К, среда охлаждения — вода. Минимальных ($a_n = 5,0$) при температуре переработки — 515,5 К, извлечения материала — 485,5 К, среде охлаждения — воздух.

МОДИФИКАЦИЯ БУТАДИЕНСТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА НОВЫМ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫМ ОЛИГОМЕРОМ

К.В. Вишневский, А.В. Касперович, Э.Т. Крутько

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; ela_krutko@mail.ru

Многочисленные исследования в области получения резин, пластических масс, лаков, клеев, герметиков, многих других полимерных материалов свидетельствуют о возможности улучшения их эксплуатационных свойств путем малых добавок в полимер-олигомерные системы реакционноспособных низкомолекулярных, олигомерных и полимерных соединений. В этой связи представляло интерес изучить возможность использования в качестве модификатора бутадиенстирольного каучука (марка СК(М)С-30 АРКМ-15) полифункционального олигомерного соединения — бициклического производного олигоаминофенилена (ОАФ). Синтез ОАФ осуществляли высокотемпературной конденсацией пара-фенилендиамина с последующим ацилированием аминогрупп ангидридом бицикло (2,2,1)-гепт-5-ен-2,3-дикарбоновой кислоты (АБОК), который синтезировали по реакции Дильса-Альдера путем взаимодействия цикlopentadiена с малеиновым ангидридом.

Синтезированный полифункциональный олигомер, содержащий в молекуле amino-, амидо- карбоксильные группы и бициклический фрагмент с двойной связью, обладает парамагнитными свойствами (концентрация неспаренных спинов составляет $4\text{--}8 \times 10^{18}$ спин/г). В процессе циклодегидратации амидокислотные фрагменты олигомерных олигофениленов легко превращаются в имидные, которые устойчивы при нагревании на воздухе до 350°C .

Исследования физико-механических показателей резин до и после старения проводили в соответствии с ГОСТ 270-85 (режим вулканизации: температура 143°C , время вулканизации 20 мин). Содержание полифункционального олигомера в эластомерной композиции бутадиенстирольного каучука составляло 1,5 мас.%, в качестве образца сравнения использовались резины, содержащие используемый в настоящее время в резинотехнической промышленности стабилизатор в том же количестве.

Исследование прочностных показателей и твердости резин, модифицированных синтезированным продуктом, показало, что значения физико-механических показателей всех резин находились на одном уровне. Тепловое старение проводили в воздушном термостате при следующих режимах: 70°C — 120 часов; 100°C — 72 часа. При такой рецептуре коэффициент старения образцов по условной прочности при растяжении составил — 0,82, а коэффициент старения по относительному удлинению при разрыве — 0,70, что превышает по эффективности применяемый в промышленности стабили-

затор, у которого эти показатели, соответственно, составляют 0,80 и 0,59.

Таким образом, сравнение физико-механических свойств полученных образцов вулканизатов с новыми полифункциональными олигомерными добавками и в присутствии применяемого в настоящее время стабилизатора, (прочность при разрыве, относительное удлинение, твердость) до и после термостарения показало, что циклоалифатические производные олигоаминофенилена более эффективны.

Механизм упрочняющего действия полифункционального олигомерного производного олигоаминофенилена с бициклогептеновыми фрагментами, содержащими двойную связь в цикле, карбоксильные и аминогруппы, введенного в состав бутадиенстирольного каучука, заключается в том, что нанодисперсные частицы модифицирующего олигомера, введенного в состав резин, выполняют функцию антиоксиданта нецепного механизма действия благодаря перераспределению электронной плотности между атомами цепей макромолекул бутадиенстирольного каучука, обуславливая уменьшение вероятности разрушения α CH_2 -связи макромолекул, в наибольшей мере подверженной разрушению под действием кислорода воздуха.

Таким образом, разработанные смеси бутадиенстирольного каучука и реакционно-способного полифункционального олигомера (олигоаминофенилена с бициклическими фрагментами, содержащими двойную связь в цикле, способную к сополимеризации с непредельными фрагментами макромолекулярных цепей бутадиенстирольного каучука) обеспечивают достижение комплексного фрагментирующего эффекта, проявляющегося в:

- повышении параметров деформационно-прочностных характеристик эластомерных композиций;
- увеличении их стойкости к термоокислительному старению;

Кроме того, под воздействием повышенных температур в процессе переработки эластомерных композиций при формовании резинотехнических изделий возможно протекание ретродиенового синтеза бициклогептенового фрагмента олигоаминофенилена с выделением высокореакционноспособного цикlopentadiена, что может приводить к формированию дополнительных межцепных сшивок в системе эластомер-олигомерный полифункциональный модификатор, упрочняя материал формируемых изделий.

БЕЗЭМУЛЬГАТОРНАЯ ЭМУЛЬСИОННАЯ СОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

А.И. Глоба, Е.О. Богдан, Ю.В. Духович, Н.А. Волощик

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; Orion-2308@yandex.ru

Одним из распространенных способов получения полимеров является метод эмульсионной полимеризации, который характеризуется более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с другими методами синтеза. Водно-дисперсионные полимерные материалы получили разнообразное применение в различных областях промышленности и сельского хозяйства, в медицине, биотехнологии и т.д. Наиболее распространено использование акриловых дисперсий для получения водно-дисперсионных лакокрасочных материалов, однако в Республике Беларусь промышленное производство данных пленкообразователей не налажено.

Метод эмульсионной полимеризации обладает рядом преимуществ перед растворной полимеризацией и полимеризацией в массе. Он позволяет проводить процесс с высокой скоростью с образованием полимера с большой молекулярной массой, получать высококонцентрированные латексы с относительно низкой вязкостью, использовать их при переработке без выделения полимера из реакционной смеси, значительно снижать пожароопасность продукта.

Вместе с тем эмульсионная полимеризация характеризуется рядом трудностей, которые обусловлены многофазностью системы, многообразием параметров, определяющих кинетику и механизм процесса и зависящих не только от реакционной способности реагентов, но и от характера их распределения по фазам, способа и механизма нуклеации и стабилизации частиц дисперсной фазы [1—3].

В настоящей работе эмульсионную полимеризацию осуществляли перспективным методом — в отсутствие эмульгатора. Цель работы заключалась в подборе мономеров и условий синтеза безэмульгаторной эмульсионной полимеризации с получением устойчивых дисперсий анионоактивных сополимеров, а также в изучении некоторых свойств этих сополимеров.

Образцы сополимеров на основе акриловой кислоты, нитрила акриловой кислоты, стирола и бутадиена получены при температуре 60—80°C в течение 8—15 часов в присутствии персульфата аммония. Выбор мономеров обусловлен сочетанием высокогидрофильных и ионизирующихся сомономеров с гидрофобными сомономерами. Варьированием соотношения этих мономеров удалось достигнуть коллоидной устойчивости частиц дисперсной фазы, которая при проведении традиционной эмульсионной полимеризации достигается введением эмульгатора.

Варьирование соотношения указанных выше

мономеров показало, что при температуре полимеризации 80±5 °C частичная замена бутадиена на акриловую кислоту приводит к лучшей стабилизации дисперсии, росту числа латексных частиц и уменьшению их размера.

Проведенные исследования показали, что при безэмульгаторной эмульсионной полимеризации стабилизация частиц осуществляется за счет «внутреннего» заряда. При иницировании радикальной полимеризации инициаторами персульфатного типа частицы акрилатных латексов стабилизируются ион-радикалами $^*M_nSO_4^-$, которые при достижении критической длины цепи выпадают из раствора, образуя первичные частицы, которые флокулируют до образования агрегатов с плотностью заряда, обеспечивающей их устойчивость. В результате образуются олигомерные молекулы, которые обладают свойствами поверхностно-активных веществ и способны создавать мицеллоподобные структуры. Постепенно вводимые в процессе синтеза гидрофобные момеры адсорбируются этими «мицеллами» и в них происходит рост цепей.

Установлено, что увеличение температуры приводит к росту скорости полимеризации и числа латексных частиц в конечной дисперсии, уменьшению их размеров и количества образующегося коагулята, а следовательно, и к улучшению стабильности дисперсии.

Концентрация инициатора также оказывает существенное влияние на безэмульгаторную полимеризацию. В силу того, что используемый инициатор при распаде образует ион-радикал, который не только иницирует процесс радикальной полимеризации, но и выступает в роли «эмульгатора», т.к. создает заряд на поверхности латексных частиц и тем самым обеспечивает их стабилизацию.

Таким образом, генерация латексных частиц и их стабилизация при безэмульгаторной эмульсионной сополимеризации может быть осуществлена при сочетании гидрофобных мономеров с ионизирующимися или гидрофильными мономерами.

1. Решение некоторых экологических проблем полимерной химии / Н.В. Кожевников, Н.И. Кожевникова, М.Д. Гольдфайн // Известия саратовского университета. 2010. Т. 10. Сер. Химия. Биология. Экология. Вып. 2. — С. 34—42.
2. Синтез и некоторые свойства сополимеров метакриловой кислоты, нитрила акриловой кислоты и стирола в качестве основы водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей / О.К. Швецов и др. // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. 2010. Т. 53, № 3. — С. 143—146.
3. Елисеева В.И. Полимерные дисперсии. М.: Химия, 1980. 296 с.

КРИОГЕЛИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ ХИТОЗАН — ПОЛИВИНИЛОВЫЙ СПИРТ (ПВС): СИНТЕЗ И СВОЙСТВА

Е.В. Дихтярук^{1,2}, В.В. Паентко², А.К. Матковский²,
В.М. Гунько², Ю.Н. Ничипорук², А.Б. Котлярова³

¹Киевский национальный университет им. Т.Г. Шевченко; Киев, Украина

²Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко, НАН Украины; Киев, Украина

³Институт физиологии им. А.А. Богомольца НАН Украины; Киев, Украина; eugenchemlab@gmail.com

Введение. Использование веществ — гелеобразователей для создания лекарственных форм является достаточно распространенным подходом. Главное требование к гелеобразователям — обеспечение контролируемого высвобождения лекарственного препарата и отсутствие токсичности. В последнее время в качестве подобных «контейнеров» для лекарств используются полимерные криогели [1—4]. Включение в состав криогелевых композиций лекарственных веществ позволяет в дальнейшем обеспечить их контролируемое высвобождение за счет применения гелей с контролируемыми параметрами пористой структуры. Требование отсутствия токсичности носителей лекарственных средств так же обуславливает выбор компонентов гелей. Варьирование условий получения криогелей (включая скорость охлаждения, давление, количество сшивающего агента и др.) создают предпосылки для формирования структуры подобных «контейнеров» под конкретные задачи.

Цель работы. Изучить процесс криожелирования системы хитозан — ПВС при атмосферном и повышенном давлениях. Проанализировать гелеобразование в зависимости от соотношения компонентов (хитозан, поливиниловый спирт) и наличия сшивающих агентов (глутаровый альдегид, ГА). Изучить свойства полученных криогелей.

Материалы и методы. Изучены физико-химические свойства синтезированных криогелей. Определены составы, отвечающие максимальному набуханию гелей. Криогели получали из растворов поливинилового спирта со степенью гидролиза 99% и молекулярной массой 31—50 кДа и хитозана со степенью диацетилирования $\geq 75\%$ в условиях атмосферного и повышенного давления.

Результаты и обсуждение. Были синтезированы криогели при соотношении ПВС/хитозан 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 и 1:3. В качестве сшивающего агента использовали ГА как 25% раствор при определенном мольном соотношении с полимерами. Криожелирование проводили при -18°C и атмосферном давлении либо в криобомбах при давлении около 1000 атм. Методы исследования: микроскопия, ИК-спектроскопия, термогравиметрия и измерение набухания в воде.

Был проведен эксперимент по определению оптимального соотношения ГА и полимеров. Синтезировано серию криогелей ПВС/хитозан (1:3) с про-

центным содержанием ГА 5%, 10%, 15%, а также контрольный образец без ГА.

Методом оптической и трансмиссионной микроскопии показано, что процесс набухания протекает без разрушения каркаса геля. Методом ИК-спектроскопии осуществлено отнесение характеристических частот колебаний функциональных групп компонентов системы и характер взаимодействия между ними при криожелировании. Термоокислительная деструкция криогелей подтвердила предположение о большей плотности каркаса криогеля высокого давления. За счет варьирования соотношения компонентов и условий криожелирования (криогели низкого и высокого давления) можно синтезировать криогели ПВС/хитозан более плотного строения, которые характеризуются замедленной термодеструкцией.

Выводы. Предложены методики получения криогелей ПВС/хитозан с различным соотношением компонентов в условиях высокого и низкого давлений. Показано, что повышение способности к набуханию в воде имеют криогели с высоким содержанием хитозана. Установлено похожее поведение при набухании криогелей высокого и низкого давлений. Показана эластичность и прочность каркаса криогеля, который не разрушается в процессе набухания. Обоснована перспектива использования исследованных систем в качестве «контейнеров» для лекарств с контролируемым высвобождением последних. Было показано, что за счет варьирования соотношения компонентов и условий криожелирования существует возможность получать криогели с расчетной степенью набухания и, как следствие, менять емкость подобных «контейнеров» и изучать кинетику процесса высвобождения лекарственных препаратов из их объема.

1. Amita Chhatri, Jaya Bajpai & A.K. Bajpai (2011) Designing polysaccharide-based antibacterial biomaterials for wound healing applications, *Biomatter*, 1:2, 189—197
2. Luisa L.S. Dias, Herman S. Mansur, Claudio Luis Donnici & Marivalda M. Pereira (2011) Synthesis and characterization of chitosan-polyvinyl alcohol-bioactive glass hybrid membranes, *Biomatter*, 1:1, 114—119
3. V.M. Gun'ko, I.N. Savina, S.V. Mikhlovsky, Cryogels: Morphological, structural and adsorption characterisation, *Adv. Colloid Interface Sci.* 187—188 (2013) 1—46
4. V.M. Gun'ko, I. Savina, S.V. Mikhlovsky, Properties of water bound in hydrogels, *Gels* 3 (2017) 37: 1—30

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ L-МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ

И.А. Климовцова¹, И.П. Едимечева¹, Н.А. Головнева², Л.П. Круль^{1,3}

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; klimovtsova@bsu.by

²Государственное научное учреждение «Институт микробиологии НАН Беларуси», Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Молочная кислота (МК) является промышленно важным продуктом с быстро расширяющимся рынком потребления. Наиболее перспективным направлением ее использования представляется синтез высокомолекулярных соединений (полилактидов) для производства биоразлагаемых полимерных материалов, сочетающих высокие показатели эксплуатационных свойств с экологичностью. Важное значение имеет также возможность получения МК биоконверсией растительного сырья, т.е. из возобновляемых источников. Ожидается, что к 2020 г. годовой объем производства биоразлагаемых пластиков на основе МК в мире приблизится к миллиону тонн [1], и они могут стать альтернативой пластикам, получаемым из нефтяного сырья [2].

В Республике Беларусь разработаны основы биотехнологического способа получения L-МК из углеводсодержащего сырья [3]. Кроме того, имеется определенный опыт осуществления процессов гомо- и сополимеризации с участием МК и лактидов [4–6]. Вместе с тем недостаточно проработанными остаются многие вопросы, касающиеся технологических решений, направленных на получение биоразлагаемых полимерных материалов на основе L-МК, в том числе вопросы создания отечественного мономера (L-МК) для их производства.

Цель настоящей работы — получение сравнительных данных по зависимости конверсии углеводсодержащих субстратов (глюкозы и мелассы) в L-МК в процессе молочнокислой ферментации культуральной жидкости (КЖ) и отработка лабораторной методики выделения и очистки L-МК, основанной на высаждении лактата кальция известковым молоком с последующим превращением лактата в целевой продукт.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В результате проведенной работы оптимизирован состав питательной среды и параметры культивирования бактерий *Enterococcus faecalis*, влияющих на молочнокислую ферментацию стандартной (глюкоза) и модифицированной (меласса) питательных сред.

При поэтапном введении нейтрализующего агента (гидроксида натрия) и поддержании pH на уровне ~ 5,0 продуктивность конверсии мелассы составила около 0,75 г/л·час, что сопоставимо с соответствующим показателем на стандартной питательной среде с глюкозой. Интенсивное потребление углеводов и образование L-МК наблюдалось после 48 час культивирования бактерий.

Содержание L-МК в КЖ, определенное методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе фирмы «SHIMADZU» с УФ-детектором с варьируемой длиной волны при использовании внешнего стандарта (раствора L-МК), составило 3,77 и 2,13% на мелассе и глюкозе соответственно.

Отработана лабораторная методика выделения и очистки L-МК из продукта молочнокислой ферментации глюкозы и мелассы, основанная на высаждении лактата кальция известковым молоком с последующим превращением лактата кальция в целевой продукт. Содержание L-МК определяли потенциометрическим титрованием 0.5 М раствором гидроксида натрия. Выход L-МК составил 65–70%.

Таким образом, установлено, что методика выделения и очистки L-МК путем высаждения из КЖ с использованием известкового молока с последующим превращением лактата кальция в целевой продукт является приемлемой. При реализации опытно-промышленной технологии получения отечественной L-МК может потребоваться проведение некоторых дополнительных операций (фильтрация, адсорбция углеродом, испарение, кристаллизация).

1. Балов А., Ашпина О. Мировой рынок биополимеров // The Chemical Journal (Химический журнал). — 2012, №3, 48—53
2. Самуленко А.Я., Гринь С.А., Еремец В.И., Шинкарев С.М., Неминущая Л.А., Скотникова Т.А., Лермонтов С.А., Канарский А.В., Мингазова Л.А. Промышленные способы биотехнологического получения и выделения молочной кислоты // Вестник Казанского технологического университета. — 2017 (20), № 4, 123—125
3. Golovnyova N.A., Ryabaya N.E. Production of L-lactic acid by fermentation of molasses *Enterococcus faecalis* // 8th International Conference in Applied Biotechnology «Microbial biotechnology: Topically and Future», November 19—22, 2012, Kyiv, Ukraine. — P. 94—96
4. Стефаненко М.В., Пырх Т.В., Рыбаков А.А., Щербина Л.А. Исследование поликонденсации молочной кислоты // Дизайн. Материалы. Технология. — 2012, № 5, 67 — 71
5. Круль Л.П., Бутовская Г.В., Рогачев А.А., Тапальский Д.В. Структура и свойства поли-L-лактида в тонкопленочном состоянии // Химия новых материалов и биологически активных веществ. / Под ред. Свиридова Д.В. Минск: БГУ, 2016. С. 268.
6. Никишев П.А., Пискун Ю.А., Василенко И.В., Гапоник Л.В., Тимашев П.С., Акованцева А.А., Костюк С.В. Синтез блок-сополимеров стирола с D,L-лактидом методами последовательной контролируемой катионной полимеризации и анионной полимеризации с раскрытием цикла. // Высокомолек. соед. Сер. Б. — 2017 (59), № 6, 413—423

ЗАЩИТНО-СТИМУЛИРУЮЩИЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛАЦЕТАТА

И.А. Климовцова, В.О. Шабловский, А.В. Тучковская

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; klimovtsova@bsu.by

В настоящее время для формирования на поверхности ряда пищевых продуктов (сыры, колбасы и др.) полимерных покрытий, обеспечивающих стимулирование процессов созревания этих продуктов и защиту их от плесени, применяют дисперсии поливинилацетата (ПВА), содержащие биоцидные добавки. В пищевой промышленности Республики Беларусь для этой цели используют исключительно импортные дисперсии ПВА, позволяющие получить высокоэффективные защитно-стимулирующие покрытия, обладающие необходимой эластичностью. Создание подобной импортозамещающей малотоннажной продукции представляется актуальной задачей.

Цель работы — разработка эластичной поливинилацетатной пленки для пищевых продуктов.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В результате проведенной работы отработана методика эмульсионной полимеризации винилацетата [1] в воздушной среде в присутствии водорастворимого инициатора — персульфата аммония при варьировании температуры, концентрации инициатора и соотношении винилацетата и поверхностно-активного вещества.

В качестве поверхностно-активного вещества использовали поливиниловый спирт (ПВС) различных марок и производителей (Россия, Япония, РБ). По ГОСТ 10779–78 определена массовая доля ацетатных групп в исследуемых образцах ПВС [2]. Найдено, что винилацетат образует устойчивые эмульсии с водой в присутствии ПВС, содержание ацетатных групп в котором составляет 1,1—3,1%.

Известно, что покрытия на основе ПВА должны обладать высокой эластичностью, которую обычно обеспечивают введением добавок пластификаторов [3]. Значительный интерес с точки зрения формирования покрытий со стабильной эластичностью представляют пластификаторы, химически присоединенные к полимерным цепям ПВА [4]. В настоящей работе в качестве потенциальных пластификаторов использованы диоктиладипинат, олеиновая кислота, рапсовое и льняное масло. Найдено, что введение данных пластификаторов в количестве до 10% от массы исходного мономера не оказывает существенного влияния на эластичность ПВА пленки, тогда как увеличение содержания пластификаторов до 15—20% ведет к повышению эластичности. Наилучший результат получен при введении 19% олеиновой кислоты.

Взаимодействие олеиновой кислоты с компо-

нентами, входящими в состав композиций на основе дисперсий ПВА, изучали методом ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. ИК спектры записывали на спектрометре BRUKER ALPHA в режиме нарушенного полного внутреннего отражения с использованием приставки ATR Platinum.

Установлена возможность химического взаимодействия карбоксильных групп пластификатора (олеиновой кислоты) с гидроксильными группами эмульгатора (поливиниловый спирт).

Для повышения пластифицирующих свойств рапсового и льняного масла проведена их модификация (гидролиз, переэтерификация). Рапсовое масло гидролизировали при кипячении с раствором NaOH. Твердую фазу, образующуюся в результате реакции, отфильтровывали, жидкую органическую экстрагировали этилацетатом.

Льняное масло нагревали при перемешивании с бутиловым спиртом в присутствии NaOH. Полученный раствор промывали раствором хлорида натрия до достижения pH 7. Органическую фазу отделяли от водной и экстрагировали этилацетатом.

Проведена сополимеризация рапсового и льняного масла с винилацетатом при различных соотношениях в присутствии пероксида бензоила и азобис-изобутиронитрила. Установлено значительное повышение эластичности пленок при сохранении их внешнего вида при введении полученных сополимеров в процессе синтеза ПВА дисперсии.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования олеиновой кислоты, рапсового и льняного масла в качестве пластификаторов для получения эластичной ПВА пленки.

1. Карс К.Г. Сложные и простые эфиры поливинилового спирта // В кн.: Хувинк Р., Ставерман А. Химия и технология полимеров. Т. II/1. — М. — Л.: Химия. — 1965, 400—457
2. ГОСТ 10779-78. Поливиниловый спирт. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — С. 10—12
3. Пат. 2226347 Российская Федерация, МПК А 23 С 19/16. Состав для покрытия сыров / Крейцберг Г.Н. (RU), Голиков И.В. (RU), Макаревич Д.В. (RU), Свириденко Ю.Я. (RU); патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение «Ликом» (RU). — № 2002134156/13; заявл. 19.12.2002; опубл. 10.04.2004
4. Demchuk Z, Kirianchuk V, Kingsley K, Voronov S, Voronov A. Plasticizing and hydrophobizing effect of plant oil-based acrylic monomers in latex copolymers with styrene and methyl methacrylate J. of Theoretical and Applied Nanotechnology. — 2018 (6), 29—37

ЗАЩИТНО-СТИМУЛИРУЮЩИЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛАЦЕТАТА

И.А. Климовцова, В.О. Шабловский, А.В. Тучковская

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; klimovtsova@bsu.by

В настоящее время для формирования на поверхности ряда пищевых продуктов (сыры, колбасы и др.) полимерных покрытий, обеспечивающих стимулирование процессов созревания этих продуктов и защиту их от плесени, применяют дисперсии поливинилацетата (ПВА), содержащие биоцидные добавки. В пищевой промышленности Республики Беларусь для этой цели используют исключительно импортные дисперсии ПВА, позволяющие получить высокоэффективные защитно-стимулирующие покрытия, обладающие необходимой эластичностью. Создание подобной импортозамещающей малотоннажной продукции представляется актуальной задачей.

Цель настоящей работы — разработка эластичной поливинилацетатной пленки для пищевых продуктов.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В результате проведенной работы отработана методика эмульсионной полимеризации винилацетата [1] в воздушной среде в присутствии водорастворимого инициатора — персульфата аммония при варьировании температуры, концентрации инициатора и соотношении винилацетата и поверхностно-активного вещества.

В качестве поверхностно-активного вещества использовали поливиниловый спирт (ПВС) различных марок и производителей (Россия, Япония, РБ). По ГОСТ 10779–78 определена массовая доля ацетатных групп в исследуемых образцах ПВС [2]. Найдено, что винилацетат образует устойчивые эмульсии с водой в присутствии ПВС, содержание ацетатных групп в котором составляет 1,1—3,1%.

Известно, что покрытия на основе ПВА должны обладать высокой эластичностью, которую обычно обеспечивают введением добавок пластификаторов [3]. Значительный интерес с точки зрения формирования покрытий со стабильной эластичностью представляют пластификаторы, химически присоединенные к полимерным цепям ПВА [4]. В настоящей работе в качестве потенциальных пластификаторов использованы диоктиладипинат, олеиновая кислота, рапсовое и льняное масло. Найдено, что введение данных пластификаторов в количестве до 10% от массы исходного мономера не оказывает существенного влияния на эластичность ПВА пленки, тогда как увеличение содержания пластификаторов до 15—20% ведет к повышению эластичности. Наилучший результат получен при введении 19% олеиновой кислоты.

Взаимодействие олеиновой кислоты с компонентами, входящими в состав композиций на основе дисперсий ПВА, изучали методом ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. ИК спектры записывали на спектрометре BRUKER ALPHA в режиме нарушенного полного внутреннего отражения с использованием приставки ATR Platinum.

Установлена возможность химического взаимодействия карбоксильных групп пластификатора (олеиновой кислоты) с гидроксильными группами эмульгатора (поливиниловый спирт).

Для повышения пластифицирующих свойств рапсового и льняного масла проведена их модификация (гидролиз, переэтерификация). Рапсовое масло гидролизовали при кипячении с раствором NaOH. Твердую фазу, образующуюся в результате реакции, отфильтровывали, жидкую органическую экстрагировали этилацетатом.

Льняное масло нагревали при перемешивании с бутиловым спиртом в присутствии NaOH. Полученный раствор промывали раствором хлорида натрия до достижения pH 7. Органическую фазу отделяли от водной и экстрагировали этилацетатом.

Проведена сополимеризация рапсового и льняного масла с винилацетатом при различных соотношениях в присутствии пероксида бензоила и азобисизобутиронитрила. Установлено значительное повышение эластичности пленок с сохранением их внешнего вида при введении полученных сополимеров в процессе синтеза ПВА дисперсии.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования олеиновой кислоты, рапсового и льняного масла в качестве пластификаторов для получения эластичной ПВА пленки.

1. Карс К.Г. Сложные и простые эфиры поливинилового спирта // В кн.: Хувинк Р., Ставерман А. Химия и технология полимеров. Т. II/1. — М. — Л.: Химия. — 1965, 400—457
2. ГОСТ 10779-78. Поливиниловый спирт. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — С. 10—12
3. Пат. 2226347 Российская Федерация, МПК А 23 С 19/16. Состав для покрытия сыров / Крейцберг Г.Н. (RU), Голиков И.В. (RU), Макаревич Д.В. (RU), Свириденко Ю.Я. (RU); патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение «Ликом» (RU). — № 2002134156/13; заявл. 19.12.2002; опубл. 10.04.2004
4. Demchuk Z, Kirianchuk V, Kingsley K, Voronov S, Voronov A. Plasticizing and hydrophobizing effect of plant oil-based acrylic monomers in latex copolymers with styrene and methyl methacrylate J. of Theoretical and Applied Nanotechnology. — 2018 (6), 29—37

СОЗДАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ

М.А. Ксенофонов, В.С. Васильева, С.В. Выдумчик,
О.О. Гавриленко, Т.Г. Павлюкевич, С.А. Чупрынский

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

В работе представлены многофункциональные и высокопроизводительные автоматизированные машины (рис. 1), разработанные на базе новых конструкторских и инженерных решений с использованием микропроцессорной техники и специальных информационно-аналитических и логических программ для производства широкого спектра изделий из полимерных композитов.



Рис. 1. Научные комплексы автоматизированного технологического оборудования

Особые требования к оборудованию обусловлены жесткими временными ограничениями процессов смешения и подачи в формообразующие устройства пенополиуретановых композиций, широким диапазоном их соотношений и количеств, высокими адгезионными свойствами образующихся продуктов.

Научно-технической базой созданных машин и технологических процессов производства изделий послужили:

- физико-химические представления о молекулярно-структурной организации газонаполненных полимеров;
- закономерности превращений реакционно-способных мономеров в сетчатые пенополимеры на базе разработанных физических моделей, адекватно отражающие реальные механизмы образования макромолекулярных фрагментов;
- оригинальные конструкторские и технические решения с использованием лучших мировых достижений в области машиностроения и материаловедения.

Комплексы эффективных машин и устройств

для производства из полимерных композитов изделий с определенными эксплуатационными свойствами обеспечивают: равномерную подачу реагирующих компонентов в реакционную зону; точное поддержание температуры и соотношения между взаимодействующими веществами; строгое соблюдение временных параметров подачи и смешения реагирующих компонентов.

Созданные авторами наукоемкие комплексы автоматизированного оборудования по своим производственно-технологическим параметрам соответствуют лучшим мировым аналогам благодаря использованию принципиально новых идей, современной электронной компонентной базы и оригинального системного программного обеспечения. Среди них:

- смесительно-дозировочные установки высокого давления и формующее оборудование для производства многофункциональных сорбентов нефтепродуктов и эффективной изоляции трубопроводов магистральных и коммунальных тепловых сетей, газо-, нефтепроводов, технологического оборудования;
- смесительно-дозировочные установки низкого давления для производства всех типов воздушных, масляных, топливных фильтров автотракторной и авиационной промышленности, шин для медицинского оборудования, а также высоковольтных изоляторов из пеносиликонов и т.д.;
- роботизированные комплексы оборудования для изготовления уплотнительных контуров из пенополиуретана (IP 65) и пеносиликона (IP 67) для создания защиты оболочки электрооборудования и других устройств от проникновения твердых предметов, пыли и воды;
- комплексы оборудования для изготовления трехслойных панелей и других клееных конструкций для строительства недорогого качественного жилья, теплых домов, гостиниц и кемпингов, а также сервисных и торговых помещений.

Представленные в работе автоматизированные комплексы оборудования нашли широкое применение на предприятиях Республики Беларусь, России, Украины, Литвы и Австрии для выпуска широкого ассортимента разнообразной продукции из газонаполненных полимерных композитов.

МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ В МАТРИЦЕ МАЛЕИНИЗИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Н.И. Курбанова, Т.М. Гулиева, Н.Я. Ищенко, А.Т. Алыев, А.М. Кулиев

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

Одним из перспективных направлений в науке о полимерах и материаловедении последних лет являются разработка принципов получения полимерных нанокомпозитов, которые являются новейшим типом функциональных материалов и могут быть использованы в самых разнообразных сферах применения [1,2].

В последние годы проявляется значительный интерес к композиционным материалам на основе полимерных матриц и наноразмерных частиц металлов, что обусловлено широким спектром их применения — от катализа до нанотехнологии в ин-формационной технике [1].

Использование наночастиц металлов переменной валентности (медь, кобальт, никель и др.) в полимерах позволяет получать принципиально новые материалы, которые находят широкое применение в радио- и оптоэлектронике в качестве магнитных, электропроводящих и оптических сред [1,3].

Одним из способов формирования металлополимеров является высокоскоростное термическое разложение прекурсоров в растворе расплава полимера. В расплаве сохраняется ближний порядок структуры исходного полимера, а имеющиеся в нем пустоты становятся доступными для локализации образующихся частиц. В первую очередь они внедряются в межсферолитные области полимерной матрицы, в пространство между ламелями и в центры сферолитов. При этом наблюдается сильное взаимодействие между наночастицами и полимерными цепями [4].

Представленная работа посвящена получению металлсодержащих наночастиц в матрице малеинизированного полиэтилена (МПЭ) механо-химическим экологическим методом без использования растворителей путем разложения в среде полимера солей органических кислот в условиях высоких сдвиговых деформаций и исследованию структуры и свойств полученных нанокомпозитов.

Методом высокоскоростного термического разложения солей органических кислот получены металлсодержащие наночастицы в матрице МПЭ в две стадии. На первой стадии при температуре 130—140 °С, готовили на лабораторных вальцах бинарную смесь полимера и прекурсора. На второй стадии смесь прогревали в микроэкструдере «Брабендер» в среде азота при температуре 190—200 °С, в течение 10—12 минут.

Фазовый состав и структура полученных нанокомпозитов исследованы РФА и ИК-спектральными методами. Для проведения РФА и ИКС исследований были подготовлены образцы исходного МПЭ и полученных нанокомпозитов в виде пленок толщиной 0.5—1.0 мм путем прессования при температуре 170—175 °С и давлении 10 атм.

Получены металлсодержащие наночастицы в матрице (МПЭ) Фазовый состав и структура полученных нанокомпозитов исследованы РФА и ИК-спектроскопией, а термические свойства ДТА методом.

Показано, что в исследованных нанокомпозитах наблюдались отражения от плоскостей кристаллической решетки металлов, соответствующие по картотеке ASTM ряду d_{hkl} оксида цинка (ZnO) и оксида меди I (Cu_2O).

По данным ИК-спектрального анализа в составе МПЭ присутствует 3.0% малеиновых групп: полосы поглощения 1714, 1738, 1779 cm^{-1} , соответствующие C=O связи и 1017, 1045, 1163, обусловленные C—O—C связью.

Сравнивая ИК-спектры образцов исходного МПЭ и полученных нанокомпозитов, можно заключить, что они практически идентичны. Однако, в спектре с цинксодержащими наночастицами отсутствует полоса поглощения при 1779 cm^{-1} (C=O связь), но наблюдаются новые полосы поглощения при 1596 cm^{-1} , характерная для COO-, а также 432, 501, 633, 721 cm^{-1} , соответствующие валентным колебаниям Me-O связи.

Показано, что медьсодержащие наночастицы не взаимодействуют с полимерной матрицей, а внедряются в межсферолитные области ее, а цинксодержащие наночастицы присоединяются к малеиновой группе с образованием COO-Zn-OOC. Введение наночастиц оксидов металлов в полимерную матрицу, способствует стабилизации композитов, повышая температуру начала термоокислительной деструкции от 119.26 до 135.78 кДж/моль.

1. Gubin S.P., Yurkov G.Yu., Kosobudsky I.D. // International Journal of Materials and Product Technology. 2005. V. 23. N. 1—2. P. 2—25.
2. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 672 с.
3. Михайлин Ю.А. // Полимерные материалы. 2009. № 7. С. 10—13
4. Губин С.П. // Рос. хим. журн. 2000. XLIV . № 6. С. 23—31

КЛИМАТИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПЛЕНОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ КРАСОК

Т.Н. Кухта¹, Н.Р. Прокопчук²¹Институт БелНИИС, Минск, Беларусь; kuhta_tatiana@mail.ru²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

В настоящее время наибольшее распространение получили порошковые краски на основе следующих пленкообразователей: эпоксидных смол; эпоксидно-полиэфирных олигомеров (гибридных пленкообразователей); ненасыщенных полиэфирных смол [1].

При выборе порошковых красок одним из наиболее важных свойств является их стойкость к погодным факторам. Воздействие внешней среды приводит к поглощению энергии в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра. Данная энергия оказывает отрицательное воздействие как на полимер, который формирует пленку, так и на пигмент, приводя к потере блеска и изменению цвета.

Цель данной работы — оценить климатическую стойкость полимерных покрытий из порошковых красок на основе различных пленкообразователей к комплексному воздействию искусственных атмосферных факторов (УФ-облучению, влаги, температуры).

Для определения влияния вышеуказанных факторов на свойства полимерного покрытия были проведены ускоренные климатические испытания по ГОСТ 9.401-91 (метод 3), моделирующие условия эксплуатации в умеренно-холодном климате. Испытания проводились в климатической камере «Feutron» тип 3826/16 (Германия) в течение 100 циклов.

В качестве параметра определяющего качество исходных порошковых красок и степень деструкции макромолекул пленкообразователей в процессах ускоренного старения пленок использовали энергию активации термоокислительной деструкции E_d .

Показано, что значение параметра E_d для порошковых красок, относящихся к различным классам пленкообразователей существенно различаются (табл. 1). Это объясняется особенностями молекулярной структуры пленкообразователей, предопределяющей формирование пространственной полимерной сетки, а, следовательно, и устойчивость их при воздействии на пленки разрушающих факторов.

Анализ результатов показывает, что пленки из эпоксидных и полиэфирных порошковых красок после 100 циклов испытаний в климатической камере не значительно подверглись деструкции, изменение значений энергии активации E_d составило соответственно 6% и 7%, для пленок из эпоксидно-

полиэфирных красок данный показатель снизился на 42%.

Таблица 1. Результаты климатических испытаний покрытий

Наименование порошковой краски	Значение энергии активации, E_d , кДж/моль	
	Исходные образцы	образцы после 100 циклов испытаний
Эпоксидная	108	102
Эпоксидно-полиэфирная	144	84
Полиэфирная	165	153

Ранее [2-6] многократно показано, что E_d определяет качество полимерного материала и уменьшается под воздействием эксплуатационных факторов.

Таким образом, полученные результаты подтверждают имеющуюся тенденцию на практике не применения в условиях воздействия климатических факторов покрытий из эпоксидных красок вследствие склонности их к мелению (образованию пигмента в поверхностном слое), а эпоксидно-полиэфирных (гибридных) из-за низкой их атмосферостойкости.

Выполненные исследования показали, что из порошковых красок наиболее перспективными являются составы на основе полиэфирного пленкообразователя. Эти краски, по сравнению с другими, образуют пленки более прочные, медленнее разрушающиеся под влиянием климатических факторов.

1. Яковлев, А. Д. Порошковые краски / А. Д. Яковлев. Л.: Химия, 1987. — 216 с.
2. Способ определения долговечности эластомеров: пат.1791753 СССР, МКИ G01N318//G01N1700/А.Г.Алексеев, Н.Р.Прокопчук, Т.В.Старостина, Л.О.Кисель (СССР). — N4843144/08; заявл.26.09.90; опубл.30.01.93// Бюл. N4.-8с.
3. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов. Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ1333.0-2002.
4. Прокопчук Н.Р. Полимерные материалы с повышенной устойчивостью к энергетическим и химическим воздействиям // Первый съезд ученых Республики Беларусь (Минск, 1—2 ноября, 2007 г.): сб. материалов. Минск, 2007. с 349—359.
5. Прокопчук Н.Р. Оценка долговечности полимерных изделий // Стандартизация, 2008, №1. — С. 41-45.
6. Кухта Т.Н., Прокопчук Н.Р. Пленкообразователи порошковых красок и их отвердители (обзор) // Труды БГТУ. 2018. №1: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. С. 40—52.

ТЕРМОСТОЙКАЯ КОМПОЗИЦИЯ НА ОСНОВЕ АРОМАТИЧЕСКОГО ЭПОКСИПОЛИДИАМИДОСУЛЬФОИМИДА И СООЛИГОМЕРА 1-НАФТОЛА С 1,4-ДИАМИНОБЕНЗОЛОМ

Э.Т. Асланова, Ф.М. Мамедалиева, Б.А. Мамедов

Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, г. Сумгаит; ipoma@science.az

Известно, что полифункциональные полисопряженные гомо- и соолигомеры, включающие различные функциональные группы обладают растворимостью и плавкостью, парамагнитными и полупроводниковыми свойствами и проявляют высокую активность ионного и электронного обменных процессах, а также в характерных реакциях соответствующих функциональных групп. [1, 2]. В научной литературе имеется уже достаточно сведений о способах синтеза, закономерности получения и свойствах олигонафтолов, олигофенолов, олигодигидроксibenзолов и олигоаминоариленов [3, 4]. Однако, работы, посвященные синтезу и исследованию полифункциональных полисопряженных высокомолекулярных соединений, содержащих одновременно аминные и гидроксильные группы малочисленны [5].

В связи с этим и с целью получения термостойких отвердителей для синтезированных нами диамидодиимидного эпоксидного олигомера проведена окислительная сополиконденсация 1,4-диаминобензола (ДАБ) с нафтолом. Реакция окислительной поликонденсации 1-нафтола (H_Φ) с ДАБ осуществлялась в стеклянном реакторе с объемом 0.25, снабженной механической мешалкой, обратным холодильником и капельной воронкой. В реактор помещали 0.025 моль H_Φ и 0.025 моль ДАБ, после добавления 25 мл этанола с перемешиванием нагревали до заданной температуры. Далее в реактор вводили по каплям рассчитанное количество 30%-го водного раствора перекиси водорода в течение 20÷30 минут.

Полученные олигомерные продукты экстрагировали этанолом, потом этилацетатом, растворимая в воде часть осаждала путем добавления HCl и высушивали в вакуумном шкафу.

Типичные гель-хроматограммы соолигомеров имеют бимодальный характер. Массовые показатели синтезированных при различных условия соолигомеров составляют: $\overline{M}_n = 300 \div 1300$, $\overline{M}_w = 1800 \div 5850$, $\overline{M}_w/\overline{M}_n = 3.17 \div 6.84$.

Теплофизические характеристики отвержденного эпоксидного компаунда также высоки при использовании 30масс.ч. СНДАБ, что хорошо про-

сматривается в табл.1.

В табл. 2 приведены сравнительные теплофизические, физико-механические и диэлектрические показатели отвержденных композиции АДЭС с СНДАБ и малеиновым ангидридом при одинаковых тепловых воздействий. Видно, что по теплофизическим и физико-механическим показателям отвержденная АДЭС+СНДАБ превосходит АДЭС+МА, но их диэлектрические характеристики практически идентичны.

Таблица 1. Теплофизические характеристики отвержденных композиций АДЭС+СНДАБ

Состав композиций, мас.ч.	T_{10} , К	T_{20} , К	T_{50} , К	Е, кДж/моль	ТГИ, К	Степень отверждения
АДЭС-100 СНДАБ-10	373	578	583	143.1	493	81
АДЭС-100 СНДАБ-20	398	473	568	148.2	523	88
АДЭС-100 СНДАБ-30	415	463	623	192.4	553	95

T_{10} , T_{20} , T_{50} — Температуры соответствующие 10, 20 и 50%-ной потере массы композиции

Таблица 2. Основные показатели АДЭС отвержденного СНДАБ

Показатели	СНДАБ	Малеиновый ангидрид
Тепл. по Вика ($T_{Вика}$), К	430	421
Предел проч. при раст., МПа	9.8-10.2	8.2-9.1
Предел прочности при сжатии, МПа	17.2-18.1	15.9-16.7
Предел проч. при изгибе, МПа	10.3-11.12	9.1-10.2
Относительное удлинение, %	4.3-5.2	4-5
Удел.об.сопр., Ом·см	$2.8 \cdot 10^{14}$	$4.3 \cdot 10^{14}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц	0.022-0.025	0,020-0,022

1. Pud A., Ogurtsov N., Korzhenko A., Shapoval Q. // Prog. Polym. Sci. 2003, v. 28, p. 1701
2. Huang H., Sommerfeld D., Dunn B.C. et.al. // Z.Phys. chem. 2001, v. 105, N 14, p. 3536—3541
3. Raqimov A.V., Mamedov B.A., Mustafayeva Sh.I. // Polymer, 1989, V. 6, N 10, p. 1851—1856.
4. Асланова Э.Т., Мамедов Б.А., Алиева Д.Н., Алекперов Н.А. // Азерб. хим. журн., 2004, № 2, с. 59—63
5. Mashayeva S.S., Mamedov B.A., Aqayev N.M. et. all. // Proceedings of petrochemistry and oil refining. 2008, V. 34, N 2, p. 60—69.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ КУРКУМИНА РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА МЕТОДОМ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ

Д.Л. Радюкевич¹, В.М. Акулова¹, Г.Б. Мельникова¹,
С.А. Чижик¹, Нгуен Трон Тин², Нгуен Тан Бин²¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь;²Институт прикладной физики и научного инструмента ВАНТ, г. Ханой, Вьетнам; galachkax@gmail.com

Введение. Получение микрочастиц пролонгированного действия с контролируемым высвобождением активных веществ актуальное направление в фармакологии и биотехнологии. Размер и форма микрочастиц являются одними из определяющих факторов в процессах высвобождения активных веществ. Так микрочастицы сферической имеют более простой и удобный механизм растворения. Такие частицы способны продлевать действие активного вещества, улучшать его биодоступность и снижать возможные побочные эффекты. Чаще их применяют в лекарственных формах для перорального приема, ингаляций или введением в кровоток [1-2].

Материалы и методы. Микрочастицы получали методом распылительной сушки на установке LU-222 Advanced (Labultima, Индия). Для водных и водно-спиртовых растворов использовали параметры процесса: уровень вакуума — 2100 Па, температуре осушающего газа 170 °С, давлении распыления жидкости 4 кг/см².

В качестве компонентов для формирования микрочастиц использовали амоксициллин (АМ, Фармлэнд, Республика Беларусь) и куркумин (CHEM-IMPREG INT'L INC, Mw 368,38, чистота 98,24%). Желатин марки П-11, ГОСТ 11293 выступал в качестве матрицы.

Микрочастицы желатина были получены из 3,22 мас.% водного раствора, амоксициллина (АМ) — 0,66 мас.%. Микрочастицы куркумина из 1,2 мас.% раствора ацетона при температуре осушающего газа 90°С. Составы растворов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Составы растворов для получения композитных микрочастиц

Состав/№	АМ — вода, мас.%	Куркумин в C ₂ H ₅ ОН, мас.%	Желатин в воде, мас.%
К-Ж	—	0,3	2,0
Глицерин (0,7%)-К-Ж	—	0,3	2,0
АМ-К	0,5	0,3	—
АМ-Ж	1,0	—	2,0
АМ-К-Ж	1,0	0,3	2,0

Полученные микрочастицы исследовали методом оптической микроскопии с использованием микроскопа Микро-200 (ГНПО «Планар», Республика Беларусь).

Результаты и выводы. Согласно оптическим изображениям (рис. 1) можно утверждать, что композитные составы, содержащие желатиновую матрицу, имеют сферическую форму диаметром от 3 до 7 мкм. Средний диаметр частиц чистого желатина и композитов с желатиновой матрицей совпадают.

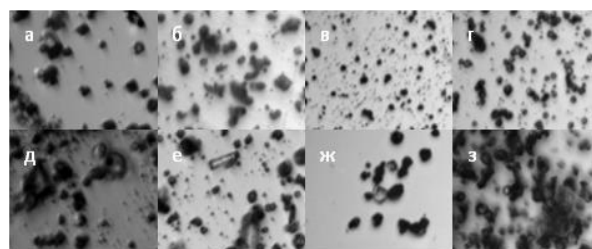


Рис. 1. Оптические изображения микрочастиц различного состава. а) желатин, б) амоксициллин, в) куркумин, г) АМ-К, д) К-Ж, е) Г-К-Ж, ж) АМ-Ж, з) АМ-К-Ж.

Микрочастицы куркумина и куркумина с АМ не имеют определенной формы. Добавление желатина в состав суспензии позволяет в процессе распыления сформировать микрочастицы сферической формы как наиболее термодинамически стабильного состояния.

Введение глицерина в раствор желатина приводит к образованию структур сферо- и палочкообразной формы (рис. 1, е). Согласно данным работы [3] происходит взаимодействие между гидроксильными группами белков желатина и глицерина, изменяется пространственная структура белков и в процессе сушки формируются частицы различной формы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф18В-007.

1. Горева А. В. [и др.] Характеристика полимерных микро- частиц на основе резорбируемых полиэфиров окислкановых кислот в качестве платформы для депонирования и доставки препаратов // Высокомолекулярные соединения. — 2012 (54), № 2, 224—236
2. Агабеков В. Е. [и др.] Нано-и микро- контейнеры для доставки биологически активных веществ // Наука и инновации. — 2017 (170), № 4, 16—19
3. Sarika P. R. [et al] Preparation, characterization and biological evaluation of curcuminloaded alginate aldehyde-gelatin nanogels// Materials Science and Engineering — 2016 (68), 251—257

ФОСФАТИДНЫЕ КОНЦЕНТРАТЫ, ВЫДЕЛЕННЫЕ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СТРУКТУРИРОВАНИЕМ. СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

И.С. Михаловский¹, Н.П. Матвейко¹, В.Н. Бабодей², А.В. Пчельникова²

¹Белорусский государственный экономический университет, Минск, Беларусь; jozef_m@tut.by

²Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию, Минск, Беларусь

Фосфолипиды (фосфатиды) представляют значительный интерес как компоненты функциональных материалов [1, 2]. Традиционно фосфатиды получают из растительных масел гидратацией в виде «вязкой жидкости» (фосфатидный концентрат) [2]. Однако, амфифильные фосфолипиды в присутствии воды образуют регулярные структуры, что приводит к образованию дисперсий неустойчивой (эмульсионной или дисперсионной) природы. В этой связи требуются исследования процессов образования фосфолипидных структур в маслах в присутствии воды, направленные на разработку новых методов получения фосфатидных концентратов.

Цель работы – разработка нового метода выделения фосфатидов из растительных масел, а также поиск новых направлений применения фосфатидов.

Материалы и методы. Сырьем для получения фосфатидных концентратов являлись рапсовое, соевое и подсолнечное нативные (нерафинированные) масла. Для этого в масла вводили определенное количество воды и гомогенизировали с использованием роторной магнитной мешалки. Затем водно-масляную эмульсию обрабатывали ультразвуком с использованием установки ИЛ100-6/1 «ИНЛАБ» (РФ). В результате получали высокодисперсную систему из фосфолипидов и воды в среде из глицеридов ненасыщенных жирных кислот. Данную дисперсию центрифугировали при 5000 об/мин с помощью центрифуги с бакет-ротором Universal 320R «Hettich» (ФРГ). В результате в поле центробежных сил имеет место процесс седиментации фосфатидных структур с образованием гелеподобного осадка, что существенно отличается от традиционной промышленной технологии получения фосфатидов в виде вязкой субстанции.

Результаты и их обсуждение. Фосфолипиды в ультразвуковом поле способны образовывать слои с полярной (электрически заряженные группы с остатком фосфорной кислоты) и гидрофобной (углеводородные остатки) поверхностями, что приводит к формированию различных структур, в том числе сферических везикул с линейными размерами до 100 нм [3]. Данный факт находит применение в прикладном использовании фосфолипидов. Наиболее активным является биомедицинское их применение. Так, с середины прошлого века и по настоящее время наблюдается интерес к исследованиям фосфолипидных структур как носителей лекарственных средств [4, 5].

В пищевой промышленности фосфолипиды

(лецитины) являются крайне востребованными в качестве эмульгаторов [6]. Кроме того, при рафинации растительных масел является актуальным разработка новой эффективной технологии отделения фосфатидов, что приведет к существенному снижению баковых отходов (фузов).

С учетом высокой пищевой ценности фосфолипидов, в сельском хозяйстве фосфатидные концентраты могут быть эффективной добавкой в корма.

Новым направлением исследований фосфолипидных структур являются сенсоры, изготовленные на их основе [7].

Современным развивающимся направлением является использование фосфатидов при создании материалов триботехнического назначения. Фосфолипиды, био- и экобезопасные соединения, способны формировать пленки на поверхности, что находит применение в создании новых смазочных средств [8, 9]. Актуальным является использование фосфолипидов в качестве функциональных добавок [9].

Заключение. Разработанный метод может быть основой промышленной технологии выделения фосфатидов из растительных масел. Полученные фосфатидные концентраты перспективны при создании новых продуктов медицинского, сельскохозяйственного, промышленного назначения.

1. Phospholipids handbook / Ed. G. Cevc. — New York: Marcel Dekker. — 1993
2. ГОСТ 32701-2014 Добавки пищевые. Лецитины. Термины и определения. — М.: Стандартинформ — 2014
3. Alipour E., Halverson D., McWhirter S., Walker G. Phospholipid bilayers: stability and encapsulation of nanoparticles // Annual Rev. Phys. Chem. — 2017 (**68**), 261—283
4. Suriyakala P., Satheesh Babu N., Senthil Rajan D., Prabakaran L. Phospholipids as versatile polymer in drug delivery systems // Int. J. Pharm. Pharmaceutical Sci. — 2014 (**6**), 8—11.
5. Bicelles: new nano systems for skin applications / Eds. Munoz-Torrero D., Haro D., Valles J. // Recent Adv. Pharmac. Sci. II. — 2012, 135—149
6. Shurtleff W., Aoyagi A. History of lecithin and phospholipids. — Lafayette: Soyinfo Center. — 2016
7. Kawasaki M., Yoshikawa H., Saito M., Jiang S., Akeyama T., Tamiya E., Noda M. A new type of LSPR sensor featuring immobilized liposome or phospholipid single layer // Proceedings MDPI. — 2018 (**2**), 1—4
8. Petelska A., Kazimierska-Drobny K., Janicka K., Majewski T., Urbaniak W. Understanding the unique role of phospholipids in the lubrication of natural joints: an interfacial tension study // Coatings. — 2019 (**9**), 1—12
9. Abo-Hataba H.F., Kandileb N.G., Salaha H.M. Eco-friendly multifunction petroleum additives: preparation, characterization and evaluation // Tribology in Industry. — 2018 (**40**), № 1 129—138

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБЛАДАЮЩИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ. СОЗДАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Ю.В. Савельев, Т.В. Травинская, А.Н. Брыкова,
А.Н. Гончар, Л.А. Марковская, Л.П. Робота

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, Киев, Украина; yuri2savelyev@gmail.com

Создание новых биологически активных материалов, разлагающихся после окончания срока использования под влиянием факторов окружающей среды на безопасные компоненты [1], направлено на повышение качества жизни человека путем создания гарантированной защиты как человека, так и окружающей среды от воздействия патогенных микроорганизмов.

Использование полимеров, синтезированных на основе природно-возобновляемого сырья, в качестве матриц-носителей биологически активных веществ (БАВ) и / или модификаторов позволяет создавать биологически активные полимеры (БАП) кратковременного и пролонгированного действия. БАП могут проявлять антимикотическую (фунгицидную), антибактериальную, антимикробную, фитопротекторную, адаптогенную, иммуностимулирующую, ростстимулирующую активность и т. д. Биологическая активность различных веществ проявляется на молекулярном и клеточном уровнях, а также на уровне микро- и макроорганизмов.

Цель. Получение и исследование полимеров, характеризующихся новым типом биологической активности.

Материалы и методы. Нами были рассмотрены два основных типа полимерных биологически-активных материалов, отличающихся по типу связи полимер-БАВ и обладающих устойчивой химической связью (системы с иммобилизованным БАВ) и связью, которая может разрушаться с течением времени (системы с контролируемым высвобождением БАВ). Также были изучены полимерные формы, содержащие БАВ, не связанные с полимерным носителем и постепенно высвобождаемые во время работы системы.

Результаты и их обсуждение. Были созданы и исследованы следующие типы БАП:

- Линейные и сшитые полиуретаны с иммобилизованными биологически активными органическими и металлоорганическими соединениями в качестве наполнителей и/или агентов, блокирующих макроцепь, включая трансформацию существующей концевой группы.

- Сшитые полиуретаны с иммобилизованными биологически активными органическими соединениями в качестве удлинителей и содержащие БАВ, несвязанные с полимерным носителем.

- Водные полиуретановые дисперсии на основе

иономерных полиуретанов, иммобилизованных органическими соединениями в форме: i) удлинителей макроцепи, ii) неорганических соединений в качестве солеобразующих агентов и iii) природных БАВ в качестве активных модификаторов.

- Полиуретан-полиакрилаты, полученные эмульсионным методом с использованием иономерного полиуретана, иммобилизованного с помощью БАВ в качестве удлинителя макроцепи (i) и в качестве эмульгатора.

- Линейные полиуретаны, включающие наночастицы Ag и Cu.

- Полимерная форма на основе нитроцеллюлозы, содержащая несвязанное с полимерным носителем БАВ

- Сшитые полиуретаны с иммобилизованным биологически активным органическим соединением в качестве удлинителя и содержащие БАВ в качестве активного модификатора.

- Композиционные пенополиуретановые материалы, содержащие БАВ.

Разработанные полиуретановые материалы благодаря:

- активности против патогенных микроорганизмов (плесневых грибов, дрожжей и бактерий), способствующих профилактике заболеваний человека, спровоцированных микроорганизмами;
- фитопротекторной и стимулирующей рост активности
- способности защищать материалы от биоразложения [2,3,4] направлены на максимальное содействие устойчивому развитию различных областей человеческой деятельности: медицины (клиническая и медицина катастроф, биомедицинские защитные покрытия и системы), сельского хозяйства (растениеводство, средства защиты), техники и инфраструктуры (защитные покрытия и клеи).

1. Travinskaya T.V., Brykova A.N., Savelyev Yu.V., Babkina N.V. and Shtompel V.I. (Bio)degradable ionomeric polyurethanes based on xanthan: synthesis, properties, and structure // International J. of Polym. Sci. — 2017, — 1—10, doi:10.1155/2017/8632072.
2. Savelyev Yu. Polymer materials against the microorganism's attack // Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances. — 2011 (3), 122-134
3. Savelyev Yu, L. Markovskaya L., O. Savelyeva O et al. Preparation and Characterization of new biologically active polyurethane foams// Material Science and Engineering: C Materials for Biological Applications. — 2014 (45), 127—135
4. Savelyev Yu., Gonchar A., Movchan B. et al. Antibacterial polyurethane materials with silver and copper nanoparticles // Materials today, 2017 (4), 87—94

СРАВНИТЕЛЬНАЯ КАВИТАЦИОННО-ЭРОЗИОННАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ФТОРОПЛАСТОВ

М.С. Стечишин, В.П. Олександренко, А.В. Мартынюк

Хмельницкий национальный университет, Украина; m-mezon@ukr.net

Цель исследования. Для научно-обоснованного выбора полимерных материалов при изготовлении деталей оборудования которое работает в условиях микроударных нагрузок (кавитации), проведены исследования кавитационно-эрозионной износостойкости фторопластов и полиолефинов в кислых, щелочных и нейтральных коррозионно-активных средах.

Материалы и методы. Сравнительный анализ кавитационно-эрозионной износостойкости фторопластов Ф4 и Ф4С15 (ударопрочный), а также полипропиленов 21060 и ПП-ТМ10УП (ударопрочный) проводили на установке с магнитострикционным вибратором УЗДН-А при мощности излучения $p = 130$ Вт, амплитуде колебаний вибратора $a = 22 \dots 65$ мкм и рабочей частоте $f = 22$ кГц.

Результаты и обсуждение. Испытания показали, что во всех средах потери массы ударопрочного полипропилена меньше чем у полипропилена. По мере увеличения кавитационной износостойкости полипропилен и ударопрочный полипропилен размещаются в ряд: кислая, нейтральная и щелочная среды.

Сравнение износостойкости при кавитации показывает, что полипропилен в сравнении с фторопластом имеет показатели износостойкости выше на 55%, 48% и 34%, соответственно, в нейтральной, кислой и щелочной средах. Тоже сравнение между ударопрочным полипропиленом и фторопластом показывает значение 50%, 210% и 60%.

Очевидно, что для изготовления кавитационно-износостойких деталей оборудования предпочтение следует отдавать, особенно при работе в кислых средах, ударопрочному полипропилену. С другой стороны, технологичность изготовления деталей, часто абсолютная коррозионная стойкость, высокие механические характеристики ударопрочного фторопласта Ф4С15 делают его очень перспективным материалом для изготовления деталей оборудования, которые работают в условиях микроударных нагрузок. При этом, чем выше коррозионная активность среды и выше возникающие механические напряжения, тем более эффективное применение ударопрочных фторопластов.

Анализ кинетики изнашивания фторопластов указывает на возможность смены механизмов поверхностного разрушения фторопластов. Установлено, что для фторопластов имеем химико-механический характер разрушения поверхности: на первом этапе ведущим является химический, а на втором — механический фактор разрушения.

Для полипропиленов установлено три зоны разрушения: I — зона химических превращений; II — зона деструкции полимера при одновременном действии химических реакций с рабочей средой, температуры, давления и

механических напряжений, и зона III — механическое разрушение продуктов деструкции полимера.

Механизм разрушения на участке I характеризуется разрывом наиболее слабых химических соединений, наличие которых обусловлена разными причинами: действием примесей и кислорода, химическими реакциями, межмолекулярным перегруппированием, а также зарождением и развитием «трещин серебра». Развитие «трещин серебра» и их скопление в зонах усиленной пластической деформации интенсифицирует проникновение рабочей среды вглубь материала и химические реакции полимера и среды. В соответствии с предварительной оценкой удельная величина разрыхленной новообразованной поверхности, которая является следствием химических реакций на поверхности образцов с полипропилена под напряжением у 96%-ом растворе серной кислоты, достигает $100 \dots 200$ см² на 1 см³ объема «трещин серебра» [1]. Эта поверхность включает в себя повышенное содержание реакционно-активных центров в виде радикалов, химических групп, фибрил, глобул, что приводит к быстрому разрушению материала. Периодические ударные волны все более ослабляют сцепление этих разрыхленных объемов между собой, а отраженные волны вымывают эти объемы материала.

В следствии разнонаправленности сил при микроударном нагружении «трещины серебра» ориентированы разнонаправленно, что способствует их пересечению и разрыву тяжей, а затем и раскрытию створок трещин и их росту, вымыванию соединенных, но уже обособленных между собой микрообъемов материала. Последнее является характерным признаком III зоны разрушения, что характеризуется уменьшением скорости потерь массы. В III периоде разрушения окончательно раскрываются тяжи, а поверхностный шар, который соответствует глубине залегания «трещин серебра» почти полностью вымывается из поверхности материала (~80%) и нагрузку уже начинает воспринимать следующий слой поверхности. Скорость потерь массы приближается к нулю.

Таким образом, для полипропиленов при кавитационном изнашивании в коррозионно-активных средах, по мнению авторов, имеем термо-химико-механический характер разрушения поверхности.

Заключение. При работе в кислых средах при небольших и средних условиях микроударного нагружения для изготовления деталей предпочтение следует отдавать полипропилену, а при повышенных нагрузках и повышенной химической активности рабочей активности среды — фторопласту.

1. Бакнэл К.Б. Ударопрочные пластики: пер. с англ. / К.Б. Бакнэл [под ред. И.С. Лишанского]. — Л.: Химия, 1981. — 382с.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА ПУТЕМ ЕГО ДИХЛОРЦИКЛОПРОПАНИРОВАНИЯ

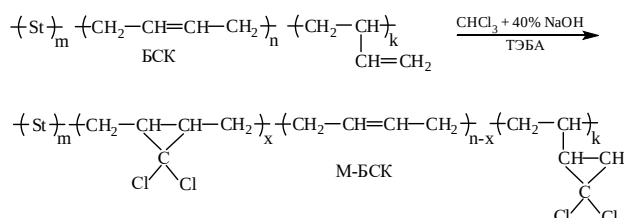
Р.З. Шахназарли, Н.Я. Ищенко, А.М. Гулиев

Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, г. Сумгайыт, Азербайджан; nelly1949@yandex.ru

Введение. Химическая модификация полиенов путем присоединения различных реагентов к двойным углерод-углеродным связям позволяет вводить функциональные группы вдоль цепи макромолекулы. В зависимости от того, происходит ли полная или частичная модификация, исходные характеристики полиенов изменяются в большей или меньшей степени. В этом плане при модификации непредельных эластомеров перспективной представляется реакция их с дихлоркарбенами, получаемыми методом щелочного гидролиза галоформов. Используя этот метод, удалось получить продукты модификации полиизопрена и полибутадиена [1,2]. Присоединение дихлоркарбена к двойным углерод-углеродным связям возможно в присутствии определенных катализаторов и достаточно мягких условиях [3].

Методика и результаты экспериментов. С целью химической модификации бутадиен-стирольного каучука (БСК) нами изучена реакция присоединения к нему дихлоркарбена. Благодаря использованию неполярного растворителя, бензола, были получены продукты с различной степенью модификации.

Реакцию присоединения дихлоркарбена проводили при низких температурах в растворе в условиях межфазного катализа. Такие условия были выбраны для достижения высокой скорости и выхода продуктов реакции. Генерированный в условиях щелочного гидролиза в присутствии ТЭБА дихлоркарбен, очень активен и присоединяется по двойным углерод-углеродным связям БСК. Изучение ПМР-спектров модифицированных полимеров подтвердило протекание реакции дихлорциклопропанирования по схеме:



При этом выявлено, что БСК, в зависимости от микроструктуры бутадиенового фрагмента, входящего в цепь макромолекулы (в положении 1,2- или 1,4-), проявляет различную реакционную способность по отношению к дихлоркарбену. Винильная группа в 1,2-звеньях является более реакционноспособной по

сравнению с внутренней двойной связью. В условиях реакции дихлорциклопропанирования процесс присоединения по винильной группе протекает со 100%-ным присоединением дихлоркарбена, что может быть объяснено большей нуклеофильностью двойной связи и ее стерической доступностью. Структура полученных продуктов установлена данными химического и спектрального анализов. Выявлено, что протоны двойной связи $-\text{CH}=\text{CH}-$ и $-\text{CH}=\text{CH}_2$ резонируют при $\delta = 5,1$ м.д. и $\delta = 4,9$ м.д. соответственно. После присоединения CCl_2 эти сигналы исчезают, но появляются сигналы при $\delta = 0,6—1,3$ м.д., характеризующие наличие циклопропанового кольца. Также наблюдается смещение сигналов протонов метиленовых групп у двойной связи ($\text{CH}_2-\text{C}=\text{C}$) в более сильное поле $\delta = 1,95—1,93$ м.д. ($\delta = 2,01$ м.д. в исходном БСК).

Таким образом, данные ПМР-спектроскопии не только подтверждают наличие циклопропановых групп, но и позволяют установить их местоположение в цепи макромолекулы БСК.

БСК сохраняет свои высокоэластические свойства при частичной модификации дихлоркарбеном. Полученные продукты представляют собой кристаллические белые вещества, растворимые в ТГФ, хлороформе, ДМФА и плохо растворимые в алифатических и ароматических углеводородах. Их растворимость напоминает поведение в растворителях хлорированных каучуков. Термическая стабильность составляет $200—225$ °С, а процесс термического разложения начинается с 250 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики (совместный грант № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/09/4-M-07) и Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований (совместный грант № T18A3-001).

1. А.Б. Глазырин, М.И. Абдуллин, Р.Р. Муслухов. Дихлорциклопропановые производные синдиотактического 1,2-полибутадиена // Высокомолек. соед. 2012, Сер. Б, т. 54, № 4, с. 635—640.
2. M. Makosza, M. Fedoryński. Phase transfer catalysis in dichlorocarbene chemistry: basic principles and specific features // Russian Chemical Bulletin. 2011, V.60, N 11, p. 2141—2146.
3. Makosza M. Two-phase reactions in the chemistry of carbanions and halocarbens — a useful tool in organic synthesis // Pure and Appl. Chem. 1975, V. 43, N 3—4, p. 439—462.

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПОЛИПРОПИЛЕНА ГЛИЦИДИЛОВЫМ ЭФИРОМ АЛЛИЛОВОГО СПИРТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МИНЕРАЛОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТАХ

Р.З. Шахназарли¹, Н.Я. Ищенко¹, А.М. Гулиев¹, О.А. Макаренко²

¹Институт Полимерных Материалов НАН Азербайджана, г. Сумгайыт, Азербайджан; nelly1949@yandex.ru

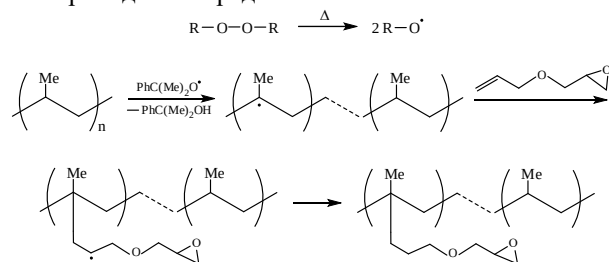
²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

Введение. Полипропилен (ПП) является одним из наиболее крупнотоннажных полимеров, применяющимся в различных областях промышленности и техники. Для получения конкурентоспособных материалов на его основе в них вводятся дешевые и доступные наполнители [1]. Для улучшения физико-механических и деформационных характеристик наполненных композитов вместо ПП используют его функционализированные производные или их добавки [2].

Цель работы — улучшение технологических, прочностных и деформационных свойств посредством химической модификации.

Методика. Функционализацию ПП проводили путем прививки к нему глицидилового эфира аллилового спирта в присутствии радикальных инициаторов пероксидного типа. Процесс проводили в две стадии. На первой стадии смешивали глицидиловый эфир аллилового спирта с инициатором и ацетоном при комнатной температуре. Затем вводили ПП и осуществляли смешение компонентов. После выпаривания ацетона смешение компонентов осуществляли в расплаве в лабораторном экструдере при температуре 180—190 °С.

Результаты экспериментов. Функционализация ПП проходит по предполагаемой схеме:



Согласно этой схеме, свободный радикал, генерированный в результате термического разложения инициатора, отрывает атом водорода от макромолекулы ПП с образованием третичного макрорадика-

ла. После этого происходит взаимодействие макро-радикала с глицидиловым эфиром аллилового спирта с последующим образованием функционализированного (эпоксидированного) ПП.

Функционализированный эпокси-содержащим модификатором ПП, был использован в качестве основы для создания композиционных материалов, наполненных бентонитом. Полученные композиционные материалы, как показали испытания, проявляют улучшенные деформационные характеристики.

Показано, что наличие в макроцепи ПП привитых эпоксидных групп приводит к интенсификации адгезионного взаимодействия между компонентами — полимерной матрицей и наполнителем. При этом наблюдается повышение модуля упругости, обеспечивается возможность повышения содержания наполнителя в полимерной матрице без ухудшения свойств композита. Данные ДСК (термограммы плавления и кристаллизации) показывают, что в смесях ПП и функционализированного ПП разделения фаз не происходит. Это означает, что кристаллизация происходит при вхождении в состав кристаллитов фрагментов как исходного, так и функционализированного ПП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики (совместный международный Азербайджано-Белорусский грант EIF-BGM-3-BRFTF-2+(2017)).

1. Функциональные наполнители для пластмасс / Под ред. М.Ксантоса. Пер. с англ. под ред. Кулезнева В.В. СПб.: Научные основы и технологии. 2010, 462 с.
2. Песецкий С.С., Макаренко О.А., Кривогуз Ю.М. Функционализация полипропилена прививкой полярных мономеров (Обзор) // Материалы, технологии, инструменты. — 2012. — т. 17. — № 2. — С. 25—48.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 4

Трибоматериаловедение

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2019)

25—28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

В.В. Алисин, М.Н. Рошин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vva-imash@yandex.ru

При сухом трении и при граничном трении с адсорбированными молекулами имеет место только дисперсионное взаимодействие. В модели рассматривается только внешнее трение. Для внешнего трения необходимо, чтобы прочность фрикционной связи была ниже, чем прочность контактирующих тел. Гипотеза (принцип Васильева) — трение твердосмазочных материалов является частным случаем граничного трения, когда смазочный слой, созданный из адсорбированных молекул, разделяет поверхности в точках фактического контакта. Керамический материал может быть антифрикционным в условиях высоких температур, если содержит наполнитель, который при нагреве выделяет пар с высоким давлением насыщения.

Рассмотрим схему изменения энергии взаимодействия между плоскостями при их сближении. Структуры материалов представляют собой систему правильно расположенных положительных ионов и электронов, движущихся в определенных энергетических зонах. Ионы совершают тепловые колебания с большей или меньшей амплитудой в соответствии с законом распределения энергии. Если энергия атомов превысит энергию связи с атомами данной поверхности E_a (точка 0) некоторые из них могут не вернуться к прежнему центру колебаний, а создать более прочную металлическую связь с атомами противоположной поверхности с энергией $q_{хим}$. При повышении температуры происходит резкое увеличение доли атомов, обладающих энергией E_a , превосходящую энергию связи атома с другими атомами тела А и достаточной для отрыва атома. В результате происходит диффузионная сварка. Для исключения схватывания в процессе торможения в металло-керамических фрикционных материалах вводят сульфиды, селениды и теллуриды которые при разложении выделяют пары серы, селена или теллура образующие на поверхности трения защитный слой. Большинство твердых тел состоят из хаотически ориентированных идеальных кристаллокристаллитов. Кристаллиты разделены границами. Плотность связей на границах на три-четыре порядка ниже, чем в кристаллитах. Размеры кристаллитов в зависимости от условий получения и эксплуатации 5... 200 нм. На поверхности трения металлов размеры кристаллитов 47...28 нм. Поэтому разрыв когезионных связей происходит на глубине 30—50 нм, где связь слабее, а не на глубине мкм, где в сплошном теле тангенциальные напряжения максимальны.

Технология направлена на модификацию поверхностей трения путем обработки образцов (втулок) в парах халькогена (сера, селен). Смысл этой

операции состоит в том, чтобы создать в керамике халькогенид, который при повышении температуры разлагается, образуя халькоген и защитную пленку на поверхности трения [12]. Повышение температуры поверхности в локальном контакте, как правило, имеет место при трении перед задиром и разрушением поверхностей. Оптимальные параметры процесса могут быть определены только экспериментально. На данном этапе работы ставится задача подтверждения выдвинутой гипотезы применительно к керамическим материалам. Основное требование к технологическому оборудованию заключается в повышении температуры до 800 °С и уменьшения времени нагрева.

С целью увеличения производительности технологического процесса обработки материалов в парах халькогена была выполнена глубокая модернизация установки, направленная на увеличение скорости нагрева веществ в реакторе. Это достигнуто за счет перехода от спирального нагревателя к нагреву ТВЧ. Процесс насыщения образцов халькогенидами осуществлялся на лабораторной установке с индукционным нагревом, схема которой приведена на рис. 1.

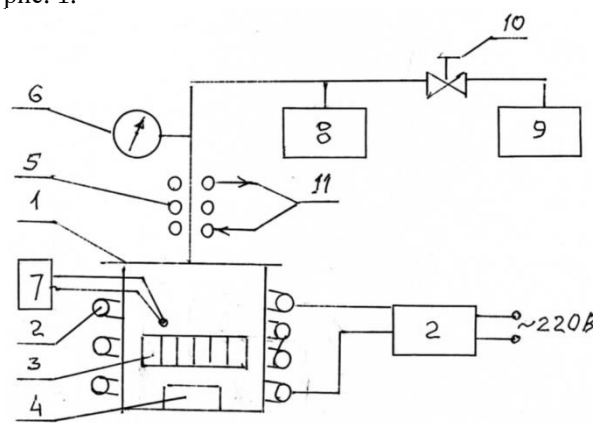


Рис. 1. Схема установки: 1) Тигель, 2) ТВЧ-индуктор с блоком питания, 3) Образцы, 4) Материал — халькоген, 5) Рубашка охлаждения, 6) Вакуумметр, 7) Регистратор температуры, 8) Вакуумметр ВИТ-2, 9) Вакуумный насос, 10) Запорный вентиль, 11) Подводка охлаждения.

Созданная установка позволила создать самосмазывающийся композиционный материал с керамической матрицей, рабочая температура которого превышает 800 °С.

1. Лукьянов А.И. Высокотемпературный синтез самосмазывающихся металлокерамических композитов // Трибология — машиностроению: Тр. XII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 80-летию ИМАШ РАН — М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018, с. 301—303.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНОГО
ПОКРЫТИЯ С ПОДСЛОЕМ AlTiN В ПАО-4В.Д. Самусенко¹, И.А. Буяновский¹, В.А. Левченко², В.Н. Матвеев²¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; samusenkovd@gmail.com²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе исследовались антифрикционные свойства как алмазоподобного (DLC) покрытия, так и алумонитрида титана (AlTiN), используемого в качестве промежуточного слоя для улучшения адгезии.

Материалы и методы исследования. Трибологические испытания проводились на лабораторной установке КТ-2 [1] по схеме трения «вращающийся шар — три ролика». В качестве исследуемых образцов, использовали шарики диаметром 12,7 мм из стали ШХ-15, и цилиндрические ролики 8х8 мм из стали 100Сг6 (аналог стали ШХ-15) на цилиндрическую поверхность которых наносились покрытия. Шпиндель машины с зажатым в нём шариком под нагрузкой 104 Н прижимается к сложенным равносторонним треугольным роликам, установленным в оправке в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя. Частота вращения шпинделя составляет 1 мин⁻¹. В процессе исследования регистрируют значения коэффициента трения. Продолжительность испытания образцов составляла 60 минут.

Толщина покрытия AlTiN+DLC составляет 1,7 мкм. Физико-механические характеристики покрытия измеренные на нанотвёрдомере Nysitron UB1750: твёрдость — 25 ГПа, модуль Юнга — 349 ГПа.

Испытания образцов проводили в смазочной среде — полиальфаолефин $\nu_{100} = 4 \text{ мм}^2/\text{с}$ (ПАО-4).

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены результаты трибологических испытаний в смазочной среде ПАО-4. При испытании образцов без покрытия коэффициент трения возрастает с 0,2 в начальный период до 0,45—0,5 при установившемся режиме. В случае испытания пары трения сталь-AlTiN происходит постепенный рост коэффициента трения в процессе испытания с 0,15 до 0,25, при этом покрытие не разрушается (рис. 2,б). При испытании пары трения сталь-AlTiN+DLC коэффициент трения, наоборот, снижается с начального значения 0,15 до 0,1 и остается стабильным в процессе испытания.

На рис.2 представлены микрофотографии поверхности роликов после испытаний. Наибольший износ соответствует испытанию пары трения сталь-сталь. Нанесение покрытий уменьшает износ, так при испытании пары трения сталь-AlTiN+DLC (рис. 2, в) видны только незначительные следы износа. Износ контртела (шара) также снижается при испытаниях роликов с покрытиями.

Выводы. Использование покрытий позволяет существенно уменьшить износ образцов и коэффи-

циент трения. Наилучший эффект достигается в случае с покрытием AlTiN+DLC

Низкие значения коэффициента трения при испытании покрытия AlTiN+DLC по всей видимости можно объяснить графитизацией поверхности трения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №.17-08-00825.

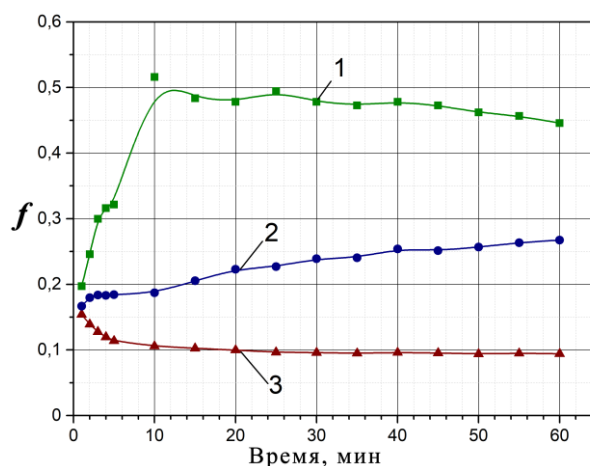


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний в смазочной среде ПАО-4: 1 — пара трения сталь-сталь; 2 — пара трения сталь-AlTiN; 3 — пара трения сталь-AlTiN+DLC

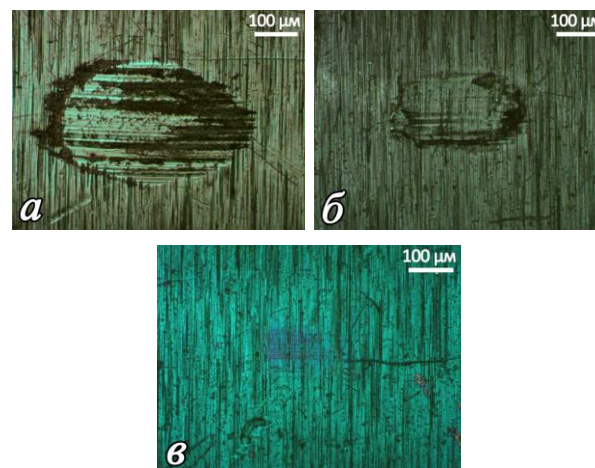


Рис. 1. Пятна износа на роликах после испытания в смазочной среде ПАО-4: а — ролик без покрытия; б — ролик с покрытием AlTiN; в — ролик с покрытием AlTiN+DLC

1. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Матвеевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А. и др. — М.: Машиностроение, 1989, — 224 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРЯЖЕНИЯ «ПОДДОН-НАПОЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ»

Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин, И.Ю. Цуканов

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия; amezrin@rambler.ru

Введение. Для обеспечения безопасности дорожного движения, целостности и сохранности грузов при их транспортировании, нормативными документами [1-5] предусмотрен целый ряд требований, обуславливающих достаточность и надёжность крепления грузов при воздействии статических и динамических сдвиговых усилий. Важнейшим параметром, входящим в расчётные уравнения по определению усилий прижима и местоположения точек их приложения, является коэффициент трения.

В соответствии с межгосударственным стандартом [1] в России для подобных расчётов используется коэффициент трения покоя, определяемый по углу наклона поддона или вил погрузчика, при которых начинается скольжение груза. Однако этот метод не позволяет оценить кинетический коэффициент трения, характерный для условий транспортирования грузов при наличии вибрации.

Анализ показывает, что оценку эффективности ламинирующих покрытий для напольного щита, определение связи их фрикционных свойств с типом относительного движения в трибосопряжении, микрорельефом рабочей поверхности щита можно, при необходимости, получить и на современном лабораторном оборудовании по результатам традиционных триботехнических испытаний.

Задача исследования состояла в сравнительной оценке эффективности ламинирующих покрытий, как средства улучшения фрикционных свойств опалубочных фанерных щитов.

Объектом испытаний были щиты ламинированной берёзовой облицованной фанеры (ТУ 5513-002-93222532-2016), предназначенной для обустройства полов в автомобильных трейлерах. В качестве ламината — термореактивный полимер, с удельным расходом покрытия соответственно 120, 130 и 220 г/м².

В качестве контробразца использовался европоддон.

Лабораторные испытания проводились на триботестере UMT-3 по схеме возвратно-поступательного относительного перемещения образцов с наложением низкочастотных вибраций.

Натурные испытания проводились скольжением нагруженного поддона по фанерному щиту.

Оригинальность способа натурных испытаний состояла в использовании дополнительного технологического поддона, устанавливаемого поверх испытываемого для укладки груза ($G = 500$ кг). При

необходимости он поддомкрачивался на 1...3 см, тем самым обеспечивая возможность свободной переустановки поддона и/или щита без удаления груза из рабочей зоны.

Результаты. Исходная шероховатость контробразца имела анизотропный характер с преимущественным направлением неровностей вдоль направления скольжения. После испытаний шероховатость контробразца в продольном направлении существенно уменьшилась. Причём для образца фанеры с расходом 130 г/м² шероховатость в направлении вдоль и поперёк относительного скольжения отличается незначительно (на 20%), в то время как для фанеры с расходом 220 г/м² отличие более существенное (50%). Этот факт можно связать с тем, что поверхность первого образца, содержащая абразивные частицы, быстрее приводит к установившемуся режиму изнашивания, которому соответствует изотропный рельеф с максимальной несущей способностью. Для второго образца за время испытания (11 ч) режим приработки не завершился.

Подтверждена целесообразность формирования «сетчатой» рабочей поверхности ламинированного фанерного щита в пределах $R_a = 13...22$ мкм, что увеличивает коэффициент трения до $\mu_{ст} \approx \mu_{кин} \approx 0,3...0,5$, причём как при поперечном, так и при продольном перемещении поддона.

Ламинирующие плёнки, являясь испытанным средством защиты фанерных щитов от внешних воздействий (влаги, масел, грязи), в то же время снижают их фрикционные свойства практически вдвое до $\mu_{кин} \approx 0,3$ на тыльной стороне щита.

Временная зависимость $\mu_{ст/кин}$ испытанных ламинирующих плёнок имеет тенденцию к плавному её росту, что можно объяснить генерацией тепла в плёнке, находящейся между сопряжёнными материалами-теплоизоляторами, и, как, следствие, к её отверждению.

Благодарности. Работа проведена при поддержке Гранта РФФИ 19-01-00231.

1. ГОСТ ISO 8611-1-2014 «Поддоны для транспортирования материалов. Плоские поддоны. Ч. 1, Методы испытаний».
2. А. Шмелёв «Трение и его роль в креплении грузов», журнал «Автоперевозчик», № 6, 2010 г., стр. 82—88.
3. А. Шмелёв «Стандарт ГОСТ 26653-2015», журнал «Компас экспедитора и перевозчика», № 3, 2017 г., стр. 28—31.
4. А. Шмелёв «Самый важный стандарт», журнал «Компас экспедитора и перевозчика», № 5, 2017, стр. 24—26.
5. VDI- RICHTLINIEN. Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen Ermittlung von Reibwerten, Blatt 14/Part 14, Düsseldorf 2011.

INVESTIGATION OF TANNIC ACID EFFECTS, ON CVD AND PVD COATINGS

D. Kazlauskas¹, V. Jankauskas¹, M. Gumbytė¹, M. Lelis²¹Vytautas Magnus University, Kaunas, Lithuania; deividaskazl@yahoo.com²Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Lithuania

Introduction

There are 427 mln. m³ of wood growing in the Lithuanian forests. On average 2,9 mln. m³ are used for production annually. Approximately 2800 Lithuanian companies are using this raw material to make their production. The annual turnover of wood industry exceeds 1100 mln. euros. If compared to other industrial areas, wood industry occupies the fourth place in Lithuania [1].

Purpose and Objectives

Objective: To evaluate the effect of tannic acids on CVD and PVD coatings used for coating metalworking tools to predict the behavior of coatings in oak processing.

Purpose:

1. Choose coatings to coat woodworking tools;
2. To investigate the composition and hardness of coatings;
3. Investigate the corrosion of coatings at 20, 80 and 140°C;
4. Evaluate the results of the study.

Methodology

Samples — tungsten carbide (WC) and cobalt (6%) hardboard for wood processing (brand T06MG, manufactured by Tigra). Plate dimensions 30×12×1.2 mm, weight 6.75 g. Tannic acid (5% aqueous solution) was used for corrosion testing. Changes in coatings and solutions were recorded every 4 hours intervals (total 16 hours). The study was performed in an autoclave SYSTEC VE-40 at 20, 80 and 140 °C. 140 °C temperature was reached at 0.4 MPa. The microstructure of the coatings was analyzed using an metallographic microscope „Nikon Eclipse MA-100“. The structural composition was determined by X-ray diffraction analysis using a Bruker D8 spec-trometer with the Cu K α radiation X-ray tube. The change in the mass of the specimens was determined by analytical scales. The pH change of the tannic acid solution was tested with the Hana Combo Hi-98130.

Results

Coating composition to tannic acid effect on XRD results of the study are presented in Figure 1. Here, in all samples, we see the dominant WC.

XRD test after corrosion of tannic acid after 16 h and 140 °C did not change. This means that the film formed by corroding is not "noticed" by the XRD method.

Samples affected by corrosion environment look different at various time — the test temperature influ-

ences the visual change of the samples surfaces.

The composition of the test surfaces was determined by the EDS assay after the effect of tannic acid.

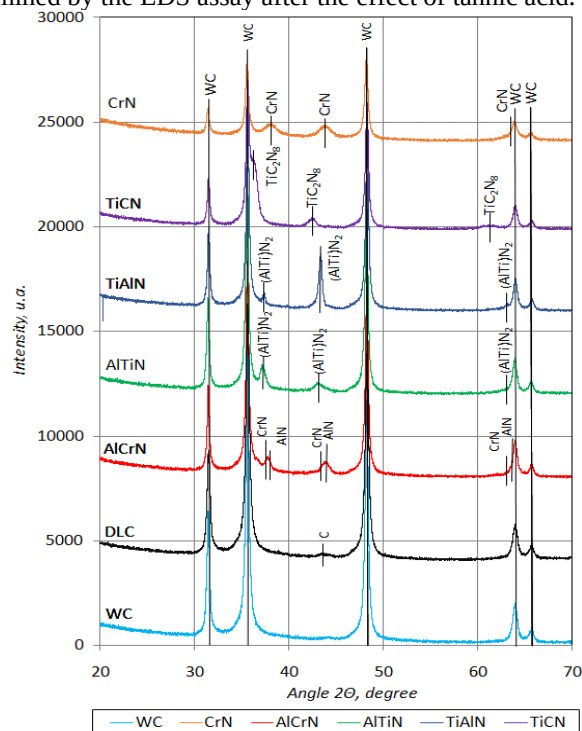


Fig. 1. Results of XRD analysis of coating composition to tannic acid effect

Conclusions

1. Tannic acid solution causes corrosion of PVD/CVD coatings.
2. It is possible that with varying temperatures and the effect of tannic acid on PVD/CVD coatings, corrosive layers of different thicknesses are formed.
3. The influence of tannic acid on PVD/CVD coatings is ambiguous and the studies should be continued.

1. Kazlauskas D., Jankauskas V., Woodworking tools: Tribological problems and directions of solutions, The 9th International Conference BALTTTRIB'2017.
2. Bodirlau R., Spiridon I., Teaca C. A., Chemical Investigation of Wood Tree Species in Temperate Forest in East-Northern Romania, Chemistry of Romanian tree species, BioResources 2(1), 41—57, 2007.
3. Bjurhager, Mechanical behaviour of hardwoods-effects from cellular and cell wall structures, Department of Fibre and Polymer Technology, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2008
4. Darmawan W., Rahayu I., Nandika D., Marchal R., The importance of extractives and abrasives in wood materials on the wearing of cutting tools 2012, BioResources 7(4), 4715—4729.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МОРОЗОСТОЙКОЙ РЕЗИНЫ

А.В. Морозов

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

В последнее время в России значительно повысился интерес к освоению Арктических регионов страны, появилась стратегия их развития, указывающая на дефицит технических средств и технологических возможностей по изучению, освоению и использованию Арктических пространств и ресурсов. В связи с этим разработки новых эластомерных композитов, для техники, работающей в экстремальных климатических условиях, является актуальной проблемой. Основной задачей при создании таких материалов является сохранение высокоэластичности при низких отрицательных температурах и обеспечение набора эксплуатационных свойств. С этой целью морозостойкие резины модифицируются малыми концентрациями наполнителей различной природы. Одними из современных наполнителей являются углеродные нанотрубки (УНТ).

Цель — оценить влияние армирования УНТ морозостойкой резины на ее износостойкость.

Материалы и методы. В работе исследовались образцы, отличающиеся концентрацией УНТ ω введенных в состав резины на основе морозостойкого эпихлоргидринового каучука (ЭПХГ), см. табл. 1. Контртело представляло собой диск с наклеенной на его поверхность наждачной бумагой разной зернистости (120 и 250 мкм).

Экспериментальное исследование интенсивности изнашивания I проводилось на лабораторном трибометре по схеме контакта кольцо — диск [1]. Испытание образцов осуществлялась при постоянных значениях нормальной нагрузки $P = 422$ Н (0,4 МПа), скорости скольжения $V = 1$ см/с и объемной температуре равной 23 °С. Истирание образцов выполнялось на пути трения $L = 400$ см. По результатам взвешивания образцов до и после испытания определялась потеря массы m на основе которой рассчитывалась интенсивность изнашивания $I = m/\rho SL$, где $\rho = 1,21$ г/см³, $S = 10,55$ см².

Результаты и их обсуждение. Результаты испытаний, для всех исследуемых образцов представлены в табл. 1. Полученные данные были рассчитаны на основе измерений потери веса из трёх опытов.

Таблица 1. Влияние УНТ на износостойкость ЭПХГ резины

Номер образца	ω , мас. ч. на 100 мас. ч.	Зернистость контртела, мкм			
		120		250	
		m , мг	I , $\cdot 10^5$	m , мг	I , $\cdot 10^5$
1	0	456	8,93	585	11,44
2	1	343	6,72	445	8,70
3	2	267	5,23	332	6,51
4	10	253	4,96	347	6,80

Используя полученные данные были построены зависимости интенсивности изнашивания от концентрации УНТ в резине (рис. 1).

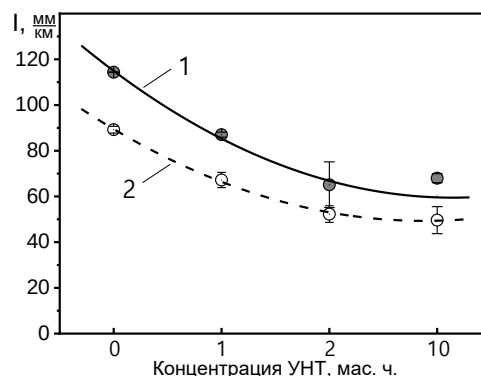


Рис. 1. Зависимость I от концентрации УНТ, где: 1 — 250, 2 — 120 мкм зернистость контртела

Анализ показывает, что с ростом концентрации УНТ в резине наблюдается повышение ее износостойкости. При этом уменьшение размеров абразивных зёрен контробразца приводит к снижению интенсивности изнашивания. А. Шалламах (1984) объяснил такое поведение уменьшением энергии разрыва (образования трещин) на менее шероховатых поверхностях.

Отметим, что для резины на основе эпихлоргидринового каучука возможно добиться кратного снижения скорости изнашивания при наполнении эластомера малым количеством УНТ (2...5 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука). Следует подчеркнуть, что в работе в качестве контртела используется наждачная бумага, позволяющая провести сравнительные испытания в некотором идеализированном предельном режиме. Данное обстоятельство позволяет в обозримые сроки изучить влияния наполнителей на сопротивление истиранию резины, а также оценить влияние размера абразивных зёрен на скорость этого процесса.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-08-00615).

Автор выражает благодарность проф. Н.Н. Петровой и ст. преподавателю Е.Н. Тимофеевой за изготовление образцов.

1. Морозов А.В., Петрова Н.Н. Методика оценки коэффициента трения уплотнительных морозостойких резин // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 2. 162—167.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ОРГАНОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ТКАНОГО АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Г.С. Кулагина, Г.Ф. Железина

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия;

gskulagina@gmail.com

В докладе рассмотрены самосмазывающиеся антифрикционные материалы (органопластики), предназначенные для формирования тонких покрытий (0,2 — 0,5 мм) на несущей основе (металлические сплавы, ПКМ) в узлах трения, работающих при высоких нагрузках.

Представлены состав, структура и некоторые свойства антифрикционных органопластиков как серийно выпускаемых во ФГУП «ВИАМ», так и перспективных материалов с повышенными потребительскими свойствами.

Антифрикционные органопластики представляют собой полимер-полимерные композиционные материалы на основе тканого армирующего наполнителя и связующего.

Армирующий наполнитель выполнен в виде комбинированной двухсторонней ткани из полимерных волокон двух типов, благодаря чему сочетает в себе высокие физико-механические и антифрикционные свойства. Связующее в составе антифрикционного материала выполняет функцию полимерной матрицы и обеспечивает адгезионное соединение покрытия с несущей основой и монолитность структуры пластика.

В работе для изготовления антифрикционных органопластиков использовали наполнители на основе: политетрафторэтиленовых (ПТФЭ) и арамидных волокон (ПИ); политетрафторэтиленовых и арамидных волокон (ПА); волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и арамидных.

Использовали два типа реакционноспособных связующих: растворное фенольно-каучуковое и расплавленное эпоксидное связующее.

Изготовление антифрикционных материалов осуществляется по препреговой технологии. Формирование покрытия на несущей основе осуществляется путем формования (прессового, автоклавного, вакуумного) в условиях, необходимых для отверждения конкретного связующего (130—200 °С).

Структура и свойства антифрикционных органопластиков. Исследованы структура полимерного наполнителя, микроструктура поверхности органопластика в исходном состоянии и после испытаний на трение.

Представлены данные по оценке физико-механических свойств органопластиков и их адгези-

онной прочности по отношению к металлической несущей основе (конструкционная сталь). Показано, что наилучшими физико-механическими характеристиками и прочностью при отставании от конструкционной стали обладают органопластики на основе наполнителя, содержащего в качестве усиливающего компонента — арамидные волокна.

Антифрикционные свойства. Антифрикционные свойства исследуемых органопластиков обеспечиваются волокнами ПЭТФ или СВМПЭ, входящие в состав армирующего тканого наполнителя. Механизм работы материала реализуется за счет формирования на поверхности контакта двух тел самосмазывающейся пленки антифрикционного компонента, которая пролонгировано возобновляется в процессе трения. Это обеспечивает низкие значения коэффициента трения на протяжении эксплуатации. Силовые нити армирующего наполнителя обеспечивают его износостойкость.

Получены данные о коэффициентах трения для антифрикционных органопластиков различного состава при различных контактных давлениях и скоростях перемещения. Показано, что коэффициент трения антифрикционных органопластиков зависит, прежде всего, от нагрузочно-скоростных параметров проведения испытаний. Наилучшие результаты (коэффициент трения 0,03—0,10) показаны при контактном давлении в диапазоне от 15 до 150 МПа и скоростях от 0,01 до 0,04 м/с (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты трения в парах трения
органопластик-конструкционная сталь

Состав органопластика	Контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Коэф. трения, отн.ед.
Наполнитель (ПТФЭ и ПА) + фенольно-каучуковое связующее	30	0,2	0,10
Наполнитель (ПТФЭ и ПИ) + фенольно-каучуковое связующее	15—150	0,01—0,05	0,03—0,19
Наполнитель (ПТФЭ и ПА) + эпоксидное связующее	1—2	0,12	0,10—0,15
Наполнитель (СВМПЭ и ПА) + фенольно-каучуковое связующее	1—2,5	0,12	0,16—0,22

ВЛИЯНИЕ ZrC-, ZrC/Ni-ДНА-ПОКРЫТИЙ НА ИЗНОС ЛЕЗВИЙ НОЖЕЙ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА

В.В. Чаевский¹, В.В. Жилинский¹, А.К. Кулешов², П.В. Рудак³, Štefan Barčík⁴, Peter Koleda⁴

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; chayeuski@belstu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³Bel Huawei Technologies LLC, Минск, Беларусь

⁴Technology Technical University in Zvolen, Slovak Republic

Содержащие ультрадисперсные алмазы, получаемые детонацией взрывчатых веществ (ДНА) [1], композиционные электрохимические покрытия (КЭП) изделий и деталей различного назначения показывают высокие физико-механические свойства. Кроме того, сформированные методами гальванической обработки и конденсацией с ионно-плазменной бомбардировкой (КИБ) комбинированные ZrN-Ni-Co-покрытия на лезвиях ножей хвостовых фрез обеспечивают при резании материалов из ДСтП и хвойных пород древесины повышение периода стойкости режущего инструмента [2].

Цель. Поэтому для решения задач, направленных на увеличение ресурса работы инструмента, необходимо было разработать методику послойного осаждения, сформировать ионно-плазменные ZrC, гальванические Ni-ДНА и комбинированные ZrC/Ni-ДНА покрытия на поверхности лезвий ножей дерево-режущего инструмента и исследовать их износостойкость с учетом фазового и элементного состава.

Материалы и методы. Для выполнения работы были выбраны фрезы с ножами фирмы Leitz (Германия) из твердого сплава карбида вольфрама WC — 2 вес.% Co, которые широко применяются в деревообрабатывающей промышленности РБ.

Ni-ДНА КЭП наносили на подготовленную поверхность лезвий ножей при плотностях тока 0,4—4,0 А/дм² в гальваностатическом режиме электролиза из сульфаминовокислых электролитов никелирования. В качестве дисперсной фазы использовали ДНА марки «УДА-ВК» (ТУ РБ 28619110.001-95). Концентрация ДНА в электролите составляла 5 г/дм³. Толщина Ni-ДНА КЭП составила 10 мкм. ZrC-покрытия осаждались методом КИБ на поверхность лезвий ножей и с Ni-ДНА-покрытием на установке ВУ-1Б «Буллат» по стандартной методике: с предварительной обработкой ионами циркония подложки в вакууме 10⁻³ Па при потенциале подложки –1 кВ и последующим нанесением покрытий при токах горения дуги катода 80—100 А и опорном напряжении, равном –100 В, в атмосфере углеводорода CH₄ при давлении 10⁻¹ Па. Температура при осаждении соответствовала 700—800 °С. Толщина ZrC-покрытий не превышала 1,5 мкм.

Фазовый состав полученных покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа при помощи дифрактометра Ultima IV (Rigaku) в Cu-K α излучении. Морфология поверхности и элементный состав образцов изучалась методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроана-

лиза с использованием микроскопа LEO-1455 VP.

Опытно-промышленные испытания на период стойкости модифицированных ножей фрезы диаметром 21 мм при резании ламинированных ДСтП толщиной 16 мм проводили на станке с ЧПУ RANC-330. Рассчитанная длина резания ДСтП составила 9000—10000 м.п. Объемный износ лезвия ножа рассчитывался по методике определения поперечных размеров кромки лезвия по всей ее длине с помощью оптического микроскопа с учетом первоначального неизношенного угла заточки лезвия [3].

Результаты и их обсуждение. Рентгенограммы ZrC/Ni-ДНА-покрытия показывают наличие рефлекса наноалмаза (111) и рефлексов, соответствующих фазам ZrC, α -Ni. Установлено, что в условиях производства необработанные лезвия ножей фрез и лезвия с покрытиями испытывают интенсивный абразивный износ. Для ZrC-покрытий наблюдается достаточно четкая граница истирания на расстояниях до ~50 мкм от острия лезвия в отличие от ZrC/Ni-ДНА-покрытий, для которых характерна переходная область истирания (до ~100 мкм), связанная с наличием переходного Ni-ДНА-слоя. Выполненный расчет объемного износа лезвия ножей модифицированных фрез «табл. 1» показывает, что износ лезвия с ZrC-покрытием уменьшается более чем в 1,3 раза по сравнению с лезвием ножа без покрытия и лезвием с ZrC/Ni-ДНА-покрытием.

Таблица 1. Результаты расчета объемного износа лезвия ножей после резания ламинированной ДСтП

Вид обработки	Объемный износ, $\times 10^7$ мкм ³
Без покрытия	129,9 $\pm$ 0,9
ZrC-покрытие	93,6 $\pm$ 0,6
ZrC/Ni-ДНА-покрытие	115,2 $\pm$ 0,8

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ РБ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии 4.1.25», подпрограмма «Плазменные и пучковые технологии».

1. Burkat G. K., Dolmatov V. Yu. Application of ultrafine-dispersed diamonds in electroplating // *Phys. Solid State*. — 2004 (46), no 4, 703—710
2. Физико-механические свойства ZrN-Ni-Co-покрытий на лезвиях стальных ножей дерево-режущего инструмента / В. В. Чаевский [и др.] // Труды БГТУ. — 2015, № 6, 97—101
3. Influence of high energy treatment on wear of edges knives of wood-cutting tool / V. Chayeuski [et al.] // *MM Science J*. — 2016 (6), 1519—1523

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТИФРИКЦИОННЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ MODENGY™ НА ПРИМЕРЕ КЛАПАНОВ ТЭС

М.И. Прудников

ООО «Моделирование и инжиниринг» (ООО «Моденжи»), Брянск, Россия; m.prudnikov@modengy.ru

Введение. Узлы трения запорных клапанов ТЭС работают в условиях высоких контактных давлений, малых скоростей перемещения и повышенных температур. Для клапанов проблема потерь на трение весьма актуальна. От того, насколько успешно она решается в различных конструкциях, зависит ресурс клапана, усилие при позиционировании с помощью маховика или потребная мощность электропривода. Применение пластичных смазочных материалов при нагреве более +230...+250 °С неэффективно, поскольку при таких температурах происходит интенсивное испарение и окисление даже особо термостойких базовых масел. Далее рассмотрен пример успешного применения технологии твердой смазки для решения задачи снижения трения в запорных клапанах отечественного производства.

Постановка задачи. Рассматриваемые запорные клапаны применяются на ТЭС, ТЭЦ и ГРЭС в качестве управляемых запорных органов для пропуска или отсека расхода рабочей среды. Клапаны выпускаются с маховиком для ручного управления или со встроенным электроприводом.

Потери на трение в клапане в целом складываются из потерь на трение в его отдельных подвижных сопряжениях. В результате проведенного анализа было установлено, что наибольшие потери на трение имеют место в сопряжениях: резьбы штока и резьбовой втулки, гладкой цилиндрической поверхности штока и уплотнительных элементов, упорного подшипника скольжения.

С учетом условий работы клапана для решения задачи снижения трения оптимально применение технологии твердой смазки. Твердые смазочные материалы эффективны в условиях температур до +600 °С, контактных давлениях до 2500 МПа и демонстрируют низкий коэффициент трения до 0,03 при медленном скольжении до 0,5 м/с. Технология твердой смазки может быть реализована путем нанесения на детали антифрикционных твердосмазочных покрытий (АТСП).

Выбор АТСП. Компания Моденжи создана коллективом ученых и инженеров-практиков в г. Брянске с привлечением инвестиций ведущих смазочных компаний. Их усилиями разработана линейка АТСП, которая нацелена на решение наиболее острых задач в машиностроении в части трения и изнашивания. Сейчас доступно более 16 видов покрытий, в формулах которых используются связующие смолы и твердые смазочные материалы различной химической природы и структуры.

Применение АТСП позволяет полностью отка-

заться от жидких и пластичных смазочных материалов, создав узел трения, не требующий обслуживания. Покрытия наносятся однократно и работают весь срок эксплуатации изделия, обеспечивая необходимое смазывание и защиту поверхностей.

Для деталей запорного клапана были выбраны АТСП марок MODENGY™ 1001 и MODENGY™ 1006. Данные покрытия содержат высокодисперсные дисульфид молибдена и графит и работоспособны в области температур более +400 °С. Также в линейке имеется АТСП с более высокой термостойкостью до +560 °С. Оно нашло применение в лепестковых газодинамических подшипниках.

АТСП наносят путем распыления жидкого состава на подготовленную поверхность. В течение 5 минут покрытие высыхает на ощупь и деталь может быть транспортирована без риска повреждения покрытия. Полная полимеризация АТСП происходит после выдержки при определенной температуре требуемое время, которые зависят от конкретной марки покрытия.

Результаты испытаний. По результатам испытаний на заводе-изготовителе моменты открытия и закрытия клапана с деталями, на которых были нанесены АТСП MODENGY™ 1001 и MODENGY™ 1006 оказались одинаковыми и равными 5 Н·м. Момент открытия клапана на штатной термостойкой смазке Политерм составлял 25 Н·м, а закрытия — 12 Н·м соответственно.

Таким образом, при использовании АТСП момент не только уменьшился до 5 раз, но и стабилизировался. Одна из особенностей технологии твердой смазки — это обеспечение не только низкого, но и стабильного трения в широком диапазоне условий работы.

На рис. 1 показано фото штока запорного клапана с нанесенным АТСП MODENGY™ 1006.



Рис. 1. Шток клапана с АТСП MODENGY™ 1006

Закключение. Применение АТСП позволяет эффективно снижать и стабилизировать трение, повысив ресурс и энергоэффективность изделия. Это подтверждает описанный в настоящей статье опыт серийного применения АТСП. Технология проста в реализации, поскольку подразумевает использование стандартного окрасочного оборудования.

К ВОПРОСУ О ПРИЧИНАХ ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников

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

В последние два десятилетия в научной литературе активно изучаются принципиально новые материалы — высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), отличительной особенностью которых является максимальная неупорядоченность атомной структуры. Эти сплавы, состоящие из нескольких (порядка пяти) элементов с приблизительно одинаковым процентным содержанием, имеют целый ряд замечательных свойств: высокую прочность, износостойкость, температурную стабильность и т.п. [1]. Несмотря на большое число экспериментальных работ, посвященных ВЭС, полное понимание происходящих в них процессов еще не достигнуто. Основной упор делается на то, что энергия Гиббса $G=H-TS$ в случае ВЭС минимальна, и данный факт обеспечивает высокую устойчивость ВЭС.

На наш взгляд, требует выяснения вопрос о том, какого типа беспорядок в атомной структуре обеспечивает высокую износостойкость ВЭС? Что в данном случае более существенно: беспорядок в расположении атомов внутри кристаллической ячейки (*ситуация 1*) или общая неупорядоченность в сплаве (*ситуация 2*)? (Следует отметить, что несмотря на неупорядоченность структуры ВЭС наличие в них ячеек с кристаллографическими параметрами экспериментально подтверждено [1].)

Будем исследовать теоретически возможную *ситуацию 1*, когда в расширенной ячейке железа, состоящей из нескольких элементарных ячеек, часть атомов по случайному закону заменена атомами других элементов. Пусть количество этих разнородных элементов будет порядка пяти. Таким способом можно получить кристалл, состоящий из ячеек, в каждой из которых содержится большое число разнородных атомов. Вопрос состоит в том, можно ли подобрать какие-то элементы и распределить их в ячейках так, чтобы прочность такого вещества оказалась выше прочности чистого железа? В данном случае целесообразно сравнивать прочность вещества с прочностью чистого железа, потому что из известных материалов наибольшей прочностью обладают монокристаллы чистейшего железа, обнаруженные в метеоритах.

Для ответа на поставленный вопрос нами проведены квантово-химические расчеты прочности вещества, в расширенной ячейке которого размещены атомы железа и других элементов, в разных составах и количествах. В т.ч. такими элементами были: Co, Cr, Fe, Mn, Ni. Именно эти элементы использовались, например, в [2]. На рис. 1 изображены три ячейки одного из вариантов исследуемой нами структуры.

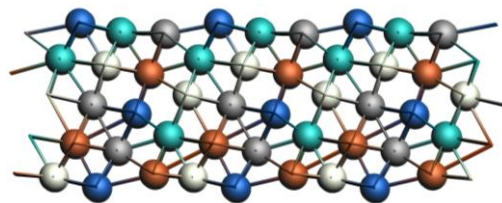


Рис. 1. Фрагмент структуры модельного соединения CoCrFeMnNi

Изучалась прочность на разрыв вдоль разных внутренних поверхностей, параллельных внешней поверхности ячеек. Установлено, что при любых сочетаниях (от двух до пяти) разнородных атомов в ячейках их прочность всегда меньше прочности структуры из ячеек, состоящих только из атомов железа. Данный результат можно обобщить следующим образом: *любые примеси, внесенные в кристаллическую ячейку чистого железа, ослабляют прочность такой ячейки и кристалла в целом.*

Это означает, что причину высокой износостойкости ВЭС следует искать в другом направлении, обозначенном выше как *ситуация 2* — неупорядоченность в общем расположении атомов в сплаве. На наш взгляд, нужно учитывать, что в сложных неупорядоченных системах механические колебания распространяются с большим затуханием. Существенно понижаются упругие характеристики среды. Спектр собственных частот определяется в основном тепловыми колебаниями с частотой порядка $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Отсутствует механизм резонансного распространения звуковой волны. В таком материале энергия деформации практически не распространяется по сплаву, а переходит в тепловую энергию участка, подвергаемому воздействию. Видимо, именно эти факты определяют то, что вероятность разрушения высокоэнтропийных сплавов меньше, а их износостойкость выше, чем у обычных металлов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» и при финансовой поддержке государства в лице Министерства высшего образования и науки России (Соглашение №14.607.21.0203, идентификатор проекта RFMEFI60718X0203).

1. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys — a new era of exploitation // Materials Science Forum — 2007, No. 560, 1—9
2. Tsai K.Y., Tsai M.H., Yeh J.-W. Sluggish diffusion in CoCrFeMnNi high entropy alloys // Acta Materialia — 2013, No 61, 4887—4897

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА В ВАКУУМЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Н.И. Смирнов¹, М.В. Прожега¹, Н.Н. Смирнов¹, С.Э. Хомяков²,
А.В. Чебурова², А.И. Беликов³, В.В. Балков³, А.Я. Бобкова³

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия; prmaksim@gmail.com

²АО «НИКИЭТ», Москва, Россия

³МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Введение. Покрытия на основе дисульфида молибдена (MoS_2) широко используют для снижения трения в экстремальных условиях. Некоторые детали Международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) планируется покрывать MoS_2 для уменьшения трения и предотвращения схватывания при работе реактора [1]. Целью представленной работы является оценка трибологических свойств покрытий MoS_2 в условиях вакуума и повышенной температуры в зависимости от толщины покрытия и предварительной выдержки во влажной среде.

Материалы и методы. Трибологические испытания проводили на пластинах 40x20x5 мм из никель-алюминиевой бронзы CuAl9NiFe4Mn1 с покрытием MoS_2 , нанесенным методом физического осаждения из газовой фазы в вакууме. Толщина покрытий в зависимости от режимов нанесения варьировалась от 6,3 до 21 мкм. Для исследования влияния влажности на трибологические свойства покрытий образцы выдерживали в климатической камере.

Испытания на трение проводили по схеме «индентор — плоскость» при возвратно-поступательном движении пластины. В качестве индентора использовали стержень из стали 316L(N)-IGs полусферическим торцом заданного радиуса.

Трибологические испытания проводили в следующих условиях:

- Давление в камере — $<5 \times 10^{-4}$ мбар (5×10^{-2} Па);
- Температура испытаний + 250 °С;
- Максимальное контактное давление (по Герцу) — 1000 МПа;
- Тип движения — возвратно-поступательный;
- Длина хода (амплитуда перемещения) — 5 мм;
- Скорость линейного перемещения — 5 мм/с;
- Путь трения — 5 м;
- Диаметр стержня — 6 мм.

Для испытаний в вакууме разработали установку, общий вид которой представлен на рис. 1.

В процессе испытаний регистрировали следующие параметры:

- силу трения;
- температуру пластины;
- давление в вакуумной камере.

Для регистрации сигналов с датчиков и управления использовали оборудование компании National Instruments и программную среду LabVIEW 2017.

Лицевая панель программы для управления и сбора данных представлена на рис. 2. Обработку полученных данных осуществляли в программном комплексе DIAdem.

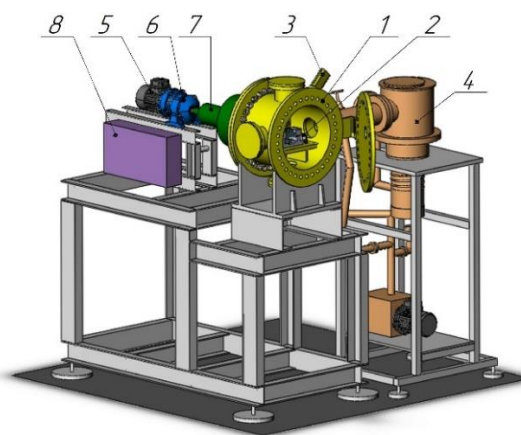


Рис. 1. Общий вид испытательной установки. 1 — вакуумная камера, 2 — испытательный узел, 3 — вакуумметр, 4 — вакуумный откачной пост, 5 — двигатель, 6 — редуктор, 7 — магнитный ввод, 8 — блок управления и измерения

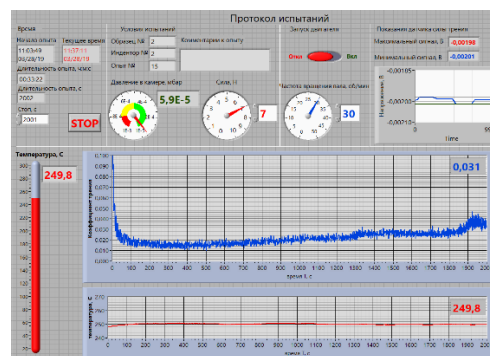


Рис. 2. Протокол испытаний покрытий

Результаты и их обсуждение. В результате испытаний получены зависимости коэффициента трения покрытий от их толщины. Выявлено влияние выдержки покрытий в климатической камере на трибологические свойства при повышенной температуре.

1. Vaughan Thompson, Russell Eaton, Rene Raffray, Konstantin Egorov. Properties of low friction anti-seize coatings for fusion applications. Fusion Engineering and Design. Article in press.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

М.В. Прожега¹, А.Ю. Иванников², А.В. Новиков³, И.В. Опарин³, А.Н. Назаров³

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия; prmaksim@gmail.com

²ИМЕТ РАН, Москва, Россия

³МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Введение. Гидроабразивное изнашивание наблюдается при воздействии на поверхность материала потока жидкости, содержащего абразивные частицы. Скорость гидроабразивного изнашивания зависит от скорости потока, угла атаки, механических свойств и концентрации воздействующих частиц, агрессивности среды, физико-механических и химических характеристик поверхности и приповерхностных слоёв материала. Для защиты поверхности применяют покрытия различного состава. Целью представленной работы является изучение механизма гидроабразивного изнашивания никелевого покрытия, нанесенного на стальную подложку.

Материалы и методы. Для исследований использовали покрытие на основе никеля, нанесенное на подложку из низкоуглеродистой стали, рис. 1. Для нанесения применили установку для плазменного напыления УПУ-3Д и никелевый порошок фракции –51+40 мкм. Толщина покрытия составляла примерно 150 мкм. Микротвердость покрытия составляла 1800±200 МПа.



Рис. 1. Структура покрытия на основе никеля

Для испытаний на гидроабразивное изнашивание использовали установку, общий вид которой показан на рис.2. Описание установки представлено в работах [1,2]. Испытания проводили при следующих режимах: продолжительность опыта — 180 мин; расход жидкости — 1,43 л/мин; абразив — электрокорунд F120; расход абразива — от 8 до 12 г/мин; угол атаки — 45° и 90°.

В качестве критерия износостойкости использовали объемную скорость изнашивания I_v [мм³/мин].

$$I_v = \frac{V}{T}$$

где V — объем изношенного материала,

T — длительность опыта.

Результаты и их обсуждение. В результате выполнения работы были получены зависимости скорости изнашивания покрытий от концентрации абразива (рис. 3), угла атаки, коррозионной активности среды.

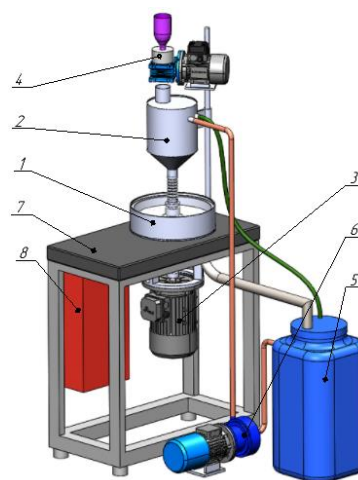


Рис. 2. Общий вид испытательной установки. 1 — испытательная камера, 2 — смеситель, 3 — двигатель, 4 — дозатор, 5 — бак, 6 — насос, 7 — станина, 8 — блок управления.

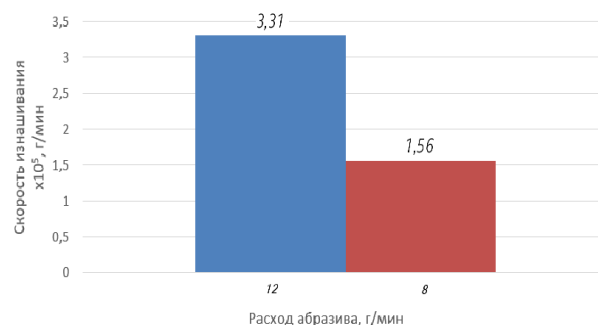


Рис. 3. Скорость изнашивания покрытия при различной концентрации абразива

1. Methodology development of the materials erosion tests N I Smirnov et al. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **489** (2019) 012031, doi:10.1088/1757-899X/489/1/012031.
2. Abrasive, hydroabrasive, and erosion wear behaviour of nanostructured (Ti,Al)N-Cu and (Ti,Al)N-Ni coatings D.S. Belov et al. Surface & Coatings Technology **338** (2018) p. 1—13, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.01.066.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА И СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

М.В. Прожега¹, Н.И. Смирнов¹, Н.Н. Смирнов¹, М.Н. Зеленская¹,
А.В. Новиков², И.В. Опарин², А.Н. Назаров²

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия; prmaksim@gmail.com

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Введение. Определение ресурса пластичных смазочных материалов (ПСМ), работающих в условиях трения качения является сложной технической задачей. Например, относительный ресурс ПСМ, работающих в механизмах аэрокосмической техники, определяют на спиральном трибометре (SOT), в основе кинематики которого лежит качение шарика между двумя плоскостями и его проскальзывание на отдельной части траектории [1,2].

В представленной работе предложен метод и оборудование для оценки смазочной способности и ресурса ПСМ, работающих в атмосферных условиях.

Материалы и методы. Для испытаний ПСМ используется упорный подшипник с внутренним диаметром 20 мм. При сборке заданное количество смазочного материала (20...26 мг) наносят на нижнее кольцо подшипника. Для определения массы ПСМ использовали аналитические весы Ohaus Adventure с точностью измерений $\pm 0,1$ мг. Материал используемых подшипников ШХ15 (AISI 52100). Представленные результаты получены на упорных шарикоподшипниках фирм SKF (Швеция), ISB (Италия).

На рис.1. представлен общий вид стенда (а) и устройство испытательного механизма (б). Момент сопротивления от возникающей силы трения при вращении испытуемого подшипника 1 регистрировали с помощью тензодатчика 2, рис. 1(б).

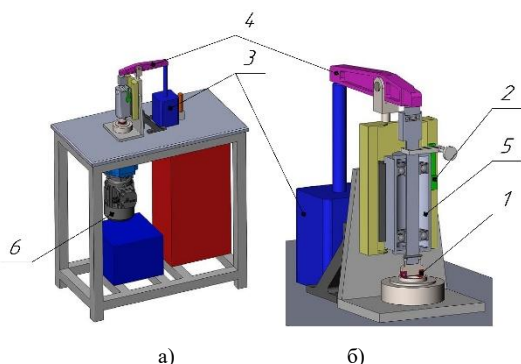


Рис. 1. Общий вид установки для испытаний ПСМ (а) и пластичной смазки в атмосферных условиях. 1 — упорный подшипник, 2 — тензодатчик, 3 — пневмоцилиндр, 4 — рычаг, 5 — корпус, 6 — приводной двигатель

Для аналого-цифрового преобразования сигналов с датчиков использовали модуль MyDAQ производства National Instruments. Осевую нагрузку на испытуемый подшипник создавали с помощью пневмоцилиндра 3 и рычага 4. В процессе испытательный регистрировали момент сопротивления, величину осевой нагрузки и температуру верхнего кольца подшипника. Программу для сбора данных и управления стендом разрабатывали в графической среде программирования LabVIEW 2017, DIAdem 2017. Протокол испытаний приведен на рис. 2.

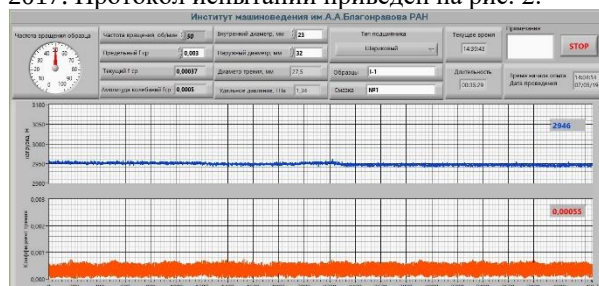


Рис. 2. Протокол испытаний в программной среде LabVIEW

Относительный ресурс ПСМ оценивали по параметру R , который представляет собой отношение количества оборотов n , которое совершает нижнее кольцо подшипника до резкого увеличения коэффициента трения, к массе ПСМ M , формула 1.

$$R = \frac{n}{M} \quad (1)$$

Для отработки методики испытаний использовали пластичную смазку на кремнийорганической жидкой основе. Состав и основные характеристики испытуемого ПСМ представлены в работе [2].

Результаты и их обсуждение. В результате выполнения работы получены характеристики относительного ресурса и смазочной способности ПСМ в атмосферных условиях.

1. M. Marchetti, W.R. Jones Jr., J. Sicre. Relative lifetimes of MAPLUB greases for space applications. NASA/TM—2002-211875, 2002.
2. M.V. Prozhega et al. Lubricating Materials for Mechanisms Operating in Space. Journal of Friction and Wear, V. 39, Issue 4, 2018, pp 335—340. DOI: 10.3103/S106836661804013X

ВЛИЯНИЕ ГРАФИТСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ КОКСА ЛИТЕЙНОГО И ШУНГИТА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

А.В. Лешок, А.Н. Роговой, М.В. Лазарчик, И.В. Фомихина

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, nil-12@inbox.ru

В настоящее время в узлах и механизмах авто-тракторной техники и техники специального назначения, работающих без смазки, используют порошковые фрикционные материалы на основе железа. В большинстве случаев они представляют собой стальную матрицу, с добавками антифрикционного, противозадирного и фрикционного назначения. Как правило противозадирную и антифрикционную функцию выполняет углеродсодержащая добавка. В литературе приводятся данные о влиянии графитов карандашного (мелкодисперсного, менее 10 мкм) и литейного (крупнодисперсного, 100–150 мкм) на триботехнические свойства фрикционного материала [1]. Отсутствует информация о влиянии углеродсодержащих добавок (кокса литейного, шунгита) на эффективность работы фрикционного материала на основе железа.

Цель работы: определение влияния графитсодержащих добавок кокса литейного и шунгита на триботехнические свойства фрикционного материала на основе железа ФМ-12 при работе без смазки.

Материалы и методы

В качестве базового фрикционного материала использовался материал ФЖ-12 (графит элементный 3–8%, порошок бронзы 8–12%, порошок свинца — 12–18%, порошок стальной 5–9%, железо — основа), используемый для изготовления фрикционных дисков редуктора стрелочного перевода [2]. В качестве графит содержащих добавок использовались порошки шунгита и кокса литейного фракции 63–160 мкм, объемным содержанием от 10 до 30%.

Испытания триботехнических свойств осуществлялись на инерционном стенде типа ИМ-58 по методу торможения инерционных масс, при котором образцы подвергались периодическому нагружению с заданной частотой, при следующих режимах: давление на материал 0,6 МПа; начальная скорость скольжения — 4,5 м/с. В качестве материала ответной детали (контртела) использовалась сталь 65Г ГОСТ 14959–79 с твердостью 48–53 HRC и шероховатостью рабочих поверхностей не выше Ra 1,25.

Результаты и их обсуждение:

Замена в составе базового фрикционного материала графита элементного на шунгит и кокс литейный показало рост коэффициента трения до 0,35–0,40 (рис. 1, а), против 0,030 при использовании графита элементного. Повышенное значение коэффициента объясняется наличием в структуре оксидных добавок. Так результаты анализа показали, что

в составе шунгита присутствуют: SiO_2 — 57,6%; С — 34,5%, S — 1,1%, Al_2O_3 — 2,0%, K_2O — 1,8%, TiO_2 — 0,5%, FeO — 1,5%, суммарное содержание остальных примесей не превышает 1,0%. В составе кокса литейного присутствуют: SiO_2 — 3,5–4,5%; Al_2O_3 — 5,0–6,0%; С — остальное, суммарное содержание примесей не превышает 1%.

Оценка интенсивности износа материала показала, что замена графита элементного на кокс литейный сохраняет износ, тогда как при замене на шунгит приводит к незначительному увеличению износа (до 5%) (рис. 1, б).

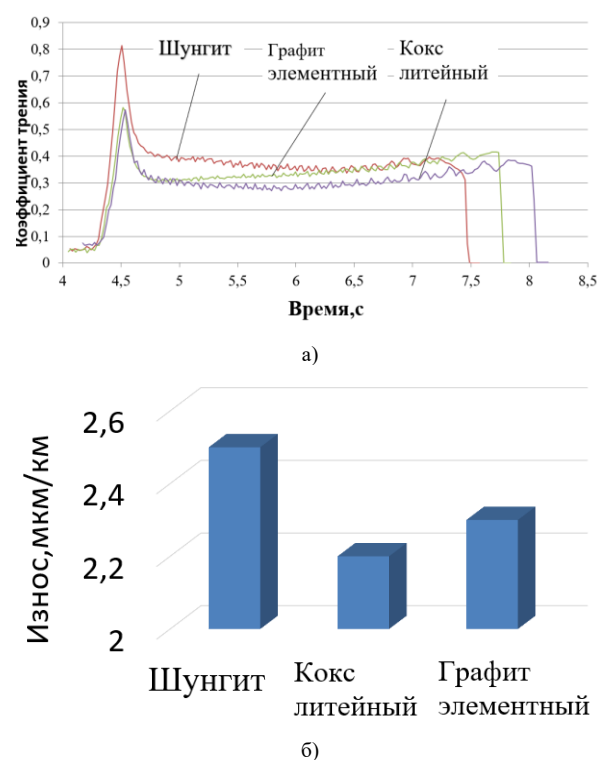


Рис. 1. Коэффициент трения (а) и износ (б) фрикционного материала ФЖ-12 при замене графита элементного на шунгит и кокс литейный

1. Болсуновская Т.А. Ефимочкин И.Ю. Севостьянов Н.В. Бурковская Н.П. «Влияние марки графита в качестве твердой смазки на триботехнические свойства металлического композиционного материала».
2. А.В. Лешок, А.Н. Роговой, М.В. Лазарчик. «Спеченный фрикционный материал для дисков стрелочного перевода СП-6Бел» Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых. Могилев, 2018.

ИСПЫТАНИЕ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ZrN В УСЛОВИЯХ МИКРОКОНТАКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Т.А. Кузнецова¹, В.А. Лапицкая¹, Б. Вархолински², 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

Взаимодействие контактирующих поверхностей субмикронных и нанометровых размеров имеет свои особенности по сравнению с деталями макро-размеров [1, 2]. Влияние сил адгезии, капиллярных и электростатических эффектов становится определяющим. Метод атомно-силовой микроскопии позволяет учесть многие феномены и аспекты взаимодействия нанометрового масштаба, провести испытания по определению коэффициента трения ($K_{тр}$) и износа и точно визуализировать их результат [3, 4].

Целью данной работы являлось определение $K_{тр}$, удельного объемного износа магнетронного покрытия ZrN методом АСМ с построением зависимостей $K_{тр}$ от количества циклов сканирования и удельного объемного износа от нагрузки, скорости перемещения зонда, количества циклов.

Материалы и методы. Покрытия ZrN были сформированы реактивным магнетронным испарением в установке TINA 900M [5]. Толщина покрытий ZrN составляла приблизительно 3 мкм.

Модуль упругости (E) и микротвердость (H) покрытий ZrN определяли на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (США) с предварительным сканированием поверхности путем внедрения алмазного индентора Берковича с радиусом закругления 200 нм с непрерывной регистрацией деформационных кривых зависимости глубины внедрения от приложенной нагрузки. Выполняли по 35 кривых при нагрузке 5 мН. Калибровку радиуса острия выполняли внедрением в калибровочный образец плавленого кварца.

Исследования микроструктуры проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа MPP-21100 (Bruker, США) с радиусом закругления острия 17 нм, с жесткостью консоли 2,63 Н/м. Износ покрытия и коэффициент трения определяли в режиме Contact Mode с использованием кантилеверов с алмазным острием на кремниевой консоли типа D300 (производство SCDprobes, Эстония) с радиусом закругления острия 40,2 нм, с жесткостью консоли 73,67 Н/м. Удельный объемный износ k_v определяли как отношение объема материала V , удаленного во время испытания на трение АСМ, к величине нормальной нагрузки L и расстоянию скольжения S [14]:

$$k_v = V/L \cdot s^{-1}. \quad (1)$$

Объем износа оценивали по площади профиля сечения дорожки износа S и периметру дорожки износа.

Результаты исследования. Методом АСМ определена исходная микроструктура поверхности, проведены трибологические испытания покрытий ZrN. Определены силы и коэффициенты трения на поверхности покрытия, получены зависимости $K_{тр}$ от количества циклов (длины пути) при различной скорости перемещения зонда (рис. 1).

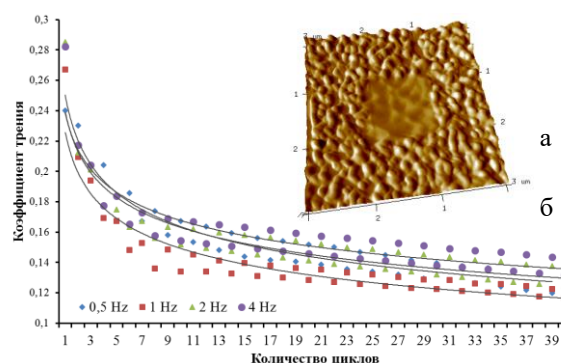


Рис. 1. След износа на поверхности покрытия ZrN (а) и зависимости $K_{тр}$ от количества циклов, выполненные при различной скорости движения зонда (б)

Выполнен износ покрытий алмазным зондом и получены зависимости глубины износа от скорости перемещения зонда, нагрузки на зонд и количества циклов сканирования.

1. Углов В.В., Анищик В.М. и др. Взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмо-усиленным химическим вакуумным осаждением // Перспективные материалы. — 2003, № 6, 5—11
2. Кузнецова Т.А., Андреев М.А. и др. Применение атомно-силовой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом склерометрии // Трение и износ. — 2007 (28), № 3, 276—281
3. Тарендь М.В., Кузнецова Т.А. Исследование методом атомно-силовой микроскопии износа поверхностей микроэлектромеханических систем / В сб.: Методологич. аспекты сканирующей зондовой микроскопии / Сб. докладов X междунар. конф. Под ред. С.А. Чижика. — 2012, 164—170
4. Kuznetsova T.A., Zubar T.I. et al. Tribological properties investigation of the thermoplastic elastomers surface with the AFM lateral forces mode 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 256 012022

ТРИБОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ПТФЭ-АМОРФНЫЙ ДИОКСИД КРЕМНИЯ ПО СТАЛИ

В.Н. Адери́ха¹, В.П. Новиков², В.А. Шаповалов¹

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, vnad@tut.by,

²Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск. Беларусь

Введение. Известно, что наполнение ПТФЭ наноразмерными частицами оксидов, нитридов, карбидов металлов, аллотропов углерода (технический углерод, углеродные нанотрубки, расширенный графит, и др.) в количестве уже 1–5 мас.% позволяет снизить скорость изнашивания на 2–4 порядка по сравнению с исходным ПТФЭ до 10^{-6} – 10^{-8} мм³/Нм. Скорость изнашивания малонаполненных наноккомпозитов ПТФЭ зависит от относительной влажности окружающей среды [1–3], что свидетельствует о значительной роли трибохимических процессов в процессе их изнашивания.

Цель работы — исследовать процессы формирования поверхности трения малонаполненного наноккомпозита ПТФЭ с аморфным диоксидом кремния во взаимосвязи с его износостойкостью при трении по стали в сравнении с аналогичным наноккомпозитом на основе адгезионно-активированного ПТФЭ (ПТФЭ-А).

Объекты и методы исследований — наноккомпозиты на основе ПТФЭ, ПТФЭ-А и их смесей, наполненные 2 мас.% аморфного SiO₂ марки БС-2. ПТФЭ-А получали обработкой порошка ПТФЭ раствором натрия в жидком аммиаке. Поверхности трения исследовали методом ATR FTIR-спектроскопии, EDAX, SEM.

Результаты и обсуждение. Установлено, что скорость изнашивания композитов ПТФЭ/БС по нержавеющей стали 40Х13 составляет $\sim 3,3 \times 10^{-5}$ мм³/Нм, а композита ПТФЭ-А/БС в 20 раз ниже и составляет $\sim 1,5 \times 10^{-6}$ мм³/Нм (рис. 1).

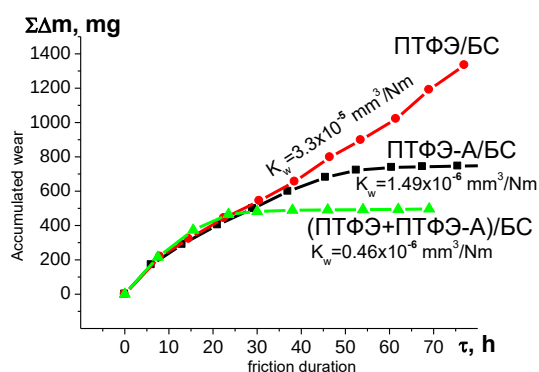


Рис. 1. Накопленный износ наноккомпозитов ПТФЭ/БС (1) и ПТФЭ-А/БС (2) и ПТФЭ+ПТФЭ-А/БС (3) от продолжительности испытаний.

Исследование поверхностей трения методом ИК спектроскопии показало (рис. 2), что при трении композита ПТФЭ/БС в поверхностном слое растет поглощение полос при 1720 см⁻¹, 3330 см⁻¹ и 1100 см⁻¹, от-

несенных к колебаниям C=O и –C–O– в неассоциированных карбоксильных группах перфторкислот – продуктах трибоокисления ПТФЭ. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что образующиеся перфторкислоты не могут взаимодействовать с поверхностью стали 40Х13, защищенной от окисления тонким слоем оксида хрома, ввиду его высокой химической стойкости и низкой адгезионной способности. Это препятствует формированию долговечных пленок переноса на контртеле, предопределяет высокую скорость изнашивания композита и преимущественное удаление мягкой полимерной матрицы. Это подтверждается, согласно данным зондового анализа, ростом содержания наполнителя в слое трения, которое, однако, не может компенсировать высокую скорость изнашивания.

Анализ спектров вычитания поверхностей трения композита ПТФЭ-А/БС показывает, что содержание функционализированного полимера в рабочем слое в ходе трения убывает, судя по снижению концентрации характерных полос поглощения при 1650–1680, 1440–1460 и 3340 см⁻¹, что предполагает избирательный перенос полимера и формирование прочных пленок переноса, обеспечивающих высокую износостойкость наноккомпозита ПТФЭ-А/БС. Сделанный вывод подтверждается экспериментально резким увеличением износостойкости композита ПТФЭ/БС при введении в его состав небольшого количества адгезионно-активного ПТФЭ-А (рис. 1, кривая 3).

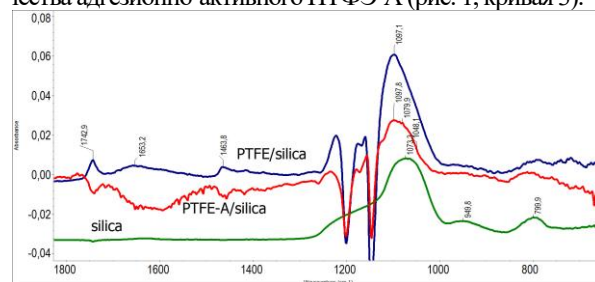


Рис. 2. ИК-спектры отражения БС и спектры вычитания поверхностей композитов ПТФЭ/БС и ПТФЭ-А/БС после трения.

- Harris K.L., Pitenis A.A., Sawyer W.G., Krick B.A., Blackman G.S., Kasprzak D.J., Junk C.P., PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films // *Macromolecules* — 2015 (48), № 11, 3739–3745
- Aderikha V.N., Krasnov A.P., Naumkin A.V., 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* — 2017 (386–387), 63–71
- Адери́ха В.Н., Новиков В.П., Филиппович С.Р., Шаповалов В.А. О влиянии адгезионной активации порошков ПТФЭ на износостойкость блочного полимера // *Трение и Износ* — 2018 (39), 449–456

ХРОМУГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ НАНОКОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ, И ИХ СВОЙСТВА

М.М. Хрущов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; michel_x@mail.ru

Цель. Целью работы явилось сравнительное изучение и оценка влияния особенностей структурно-фазового состояния легированных хромом алмазоподобных и хромуглеродных покрытий, полученных магнетронным распылением мишеней на основе хрома и детонационных наноалмазов, на функциональные свойства (коэффициент трения и долговечность стабильной работы фрикционного контакта с покрытием в условиях высоких контактных давлений, механические свойства, адгезионная прочность).

Материалы и методы. Технология получения покрытий обоих типов была описана ранее в [1, 2]. Покрытия подвергали комплексному исследованию структурных, механических и трибологических характеристик: методика и условия испытаний описаны в [1—3]).

Результаты и их обсуждение. В результате рентгеноструктурных исследований было показано, что хромуглеродные на основе хрома и наноалмазов покрытия имеют двухфазную структуру, в которой субзерна (ОКР) хрома и его карбидов/нитридов имеют одинаковый размер. Исследование методом спектроскопии комбинационного рассеяния [4] показало, что свободный углерод присутствует в виде областей микронного размера, в которых степень его графитизации меняется в широких пределах. Такая микроструктура отличается от наблюдаемой для наноккомпозитных покрытиях a -C:Cr и a -C:H:Cr, в которой включения хрома и его фаз внедрения размером $\sim 2\text{--}15$ нм хаотически распределены в аморфной матрице на основе аморфного углерода a -C или твердых углеводородов [1]. Данные [1] по размеру включений в a -C:H:Cr согласуются с результатами просвечивающей электронной микроскопии [5]. Таким образом, в случае легированных хромом покрытий аморфного углерода и хром-наноалмазных покрытий речь, фактически, идет о разных типах наноструктурированных металл-углеродных покрытий.

Результаты проведенных инструментальных исследований типичных покрытий представлены на рис. 1. Они указывают на возможное наличие корреляции между содержанием в исследованных покрытиях углерода, числом циклов, предшествующих обычно связываемому с фрикционно-усталостным разрушением материала резкому возрастанию коэффициента трения, и характеристиками адгезионной прочности.

Кроме того, было установлено, что зависимость нанотвердости хромуглеродных покрытий от размеров

ОКР, как хрома, так и его фаз, примерно соответствует эмпирическому соотношению Холла-Петча, что свидетельствует о происходящем структурном упрочнении, в отличие от структурного разупрочнения, наблюдаемого в легированных хромом покрытиях аморфного углерода, что, видимо, связано с принципиальными различиями в структурно-фазовом состоянии покрытий, различным содержанием, структурой и возможной ролью углеродной фазы в процессах пластической деформации металл-углеродных покрытий разных типов

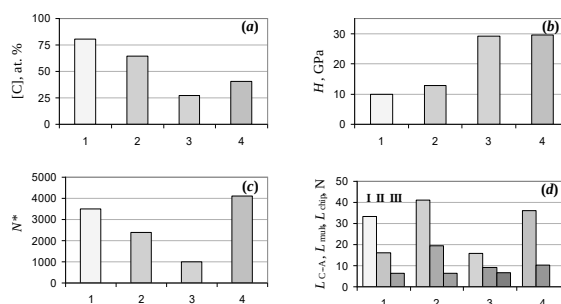


Рис. 1. Свойства покрытий a -C:H:Cr (обр. 1—3) и Cr-C (обр. 4): (a) — содержание углерода; (b) — нанотвердость; (c) — число циклов N^* до возникновения неустойчивости силы трения, при контактом давлении 450 МПа; (d) — величины, характеризующие адгезионную прочность: $L_{c \rightarrow a}$ (I) — пороговая нагрузка локального вскрытия подложки (переход от когезионного к адгезионному разрушению), L_{mult} (II) — пороговая нагрузка образования множественных трещин и L_{chip} (III) — образования локальных сколов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-01011).

1. Khrushchov M.M., Atamanov M.V., Marchenko E.A. a.o. Diamond-like Nanocomposite a -C:H:Cr Coatings: Structure, Mechanical and Tribological Properties // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. — 2014 (78), 1007—1014
2. Khrushchov M.M., Atamanov M.V., Shevchenko N.V. a.o. Chromium and Detonation Nanodiamond Based Coatings of Chromium–Carbon System: Deposition by Magnetron Sputtering, Peculiarities of Phase Composition, and Tribological Properties // J. Mach. Manuf. Rel. — 2018 (47), 160—167
3. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Petrzlik M.I. a.o. The Effect of Structure on Tribological Behavior of Chromium–Carbon Coatings Obtained by Plasma-Assisted Physical Vapor Deposition // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018 (1121), 012017
4. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Levin I.S. a.o. Structure and Tribological Behavior of Chromium–Carbon Coatings Obtained by Magnetron Sputtering // Phys. Met. Metallogr. — 2019 (120), 210–215
5. Gassner G., Patscheider J., Mayerhofer P.H. a.o. Structure of Sputtered Nanocomposite CrC_x/a -C:H Thin Films // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2006 (24), 401—498

ЛЕГИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ — ОРИЕНТАНТОВ НЕКОТОРЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ — РЕЗЕРВ ПОВЫШЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ МАСЕЛ

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

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; buyan37@mail.ru

²Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

При трении в режиме граничной смазки защита контактирующих поверхностей трущихся тел осуществляется путём образования на этих поверхностях граничных слоёв — тончайших слоёв продуктов взаимодействия активных компонентов смазочного материала и материалов трущихся тел. Образовавшиеся слои имеют либо адсорбционное происхождение, либо представляют собой химически модифицированный слой материала трущихся тел, имеющий сдвиговое сопротивление существенно меньшее, чем сопротивление сдвигу у основного материала. Для обеспечения процесса внешнего трения, уменьшения фрикционных потерь и снижения износа трущихся тел в смазочный материал вводят либо присадку ПАВ, обеспечивающую образование прочного адсорбционного слоя, либо химически активную присадку, обеспечивающую образование химически модифицированного слоя, а также снижение трения и уменьшение износа трущихся тел [1].

В докладе рассматривается альтернативный метод образования граничных слоёв как адсорбционного, так и химического происхождения. На рабочие поверхности трущихся тел наносят покрытие монокристаллического углерода, обладающее свойствами ориентанта [2]. Это покрытие обеспечивает образование высокоорганизованного адсорбционного слоя, надёжно разделяющего трущиеся поверхности при умеренных нагрузках на узел трения и при умеренных температурах. При более жёстких условиях функционирования используют также монокристаллический углерод, легированный различными элементами. Так, он может быть легирован вольфрамом [3] или молибденом [4]. В серосодержащей среде при трении сера реагирует с молибденом (или вольфрамом), образуя дисульфиды соответственно молибдена и вольфрама, что обеспечивает существенное снижение трения. При этом снижение трения обеспечивается при легировании углеродного покрытия только указанными элементами и только в серосодержащей среде.

Это показано на рис. 1 применительно к трению стали по монокристаллическому углероду как нелегированному, так и легированному соответственно кремнием и молибденом в растворе серосодержащей присадки ДФ-11. Легирование монокристаллического углерода кремнием практически не сказывается на значении коэффициента трения покрытия по стали, в то время как легированный молибденом монокристаллический углерод существенно снижает трение.

В докладе приведены результаты исследования распределения по толщине покрытия легирующих и примесных элементов в углеродных покрытиях, опре-

деления типов и относительного количества связей углерода по глубине покрытия (здесь интересно, что связи углерода с молибденом обнаружены по всей глубине образца, а связи углерода с кремнием не обнаружено вообще). Кроме того, приведены результаты исследования антифрикционных свойств трёх смазочных сред (чистого полиальфаолефинового масла ПАО-4, этого же масла с присадкой олеиновой кислоты, этого же масла с присадкой диалкилдитиофосфата цинка) при трении стали по стали, стали по стали с монокристаллическим покрытием, легированным кремнием, стали по стали с монокристаллическим покрытием, легированным молибденом). Определение наличия/отсутствия МКУ в составе покрытия проводили путем анализа полученных картин электронной дифракции в обратном пространстве и сопоставления результатов качественного анализа с литературными данными.

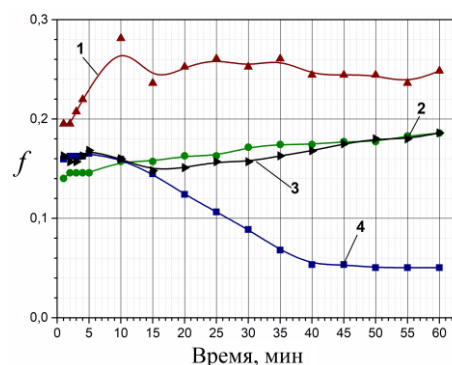


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний шара из стали ШХ-15 по роликам из стали 100Cr6: 1 — без покрытия; 2 — с покрытием монокристаллическим углеродом; 3 — с тем же покрытием, легированным кремнием; с тем же покрытием, легированным молибденом. Смазочный материал — масло ПАО-4+2% ДФ-11

Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку (проект № 19-08-01011) и специалистов ООО «Монокарбон» за помощь в проведении экспериментов.

1. Buyanovskii I.A. Boundary lubrication by an adsorption layer // Journal of Friction and Wear, 2010, v. 31, #1, pp 33—47
2. Левченко В.А., Матвеев В.Н., Дроздов Ю.Н. и др. Антифрикционное покрытие. Патент РФ №2230238, МКИ 7 F 16 C 33/04, Опубл. 10.06.2004, Бюл. № 16.
3. Podgornik B., Hainsworth S.V. Low-friction behavior of boundary lubricated diamond-like coating contained tungsten // Thin solid films, 2005. V. 476, p. 92—100.
4. Buyanovskii I.A. et al. // Journal of Friction and Wear, 2018, v. 39, #5. Pp. 371—375

ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ СМАЗОЧНОГО МАСЛА НА РАБОТУ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ С ОЦЕНКОЙ ОСТАТОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ В МАСЛЕ

А.А. Симдянкин¹, И.А. Успенский, Н.В. Бышов, М.Н. Слюсарев

Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, Рязань, Россия;
seun2006@mail.ru

Цель. Оценка изменения коэффициента поверхностного натяжения смазочного масла в зависимости от частоты и времени его обработки ультразвуком, а также времени проявления этого эффекта, и его влияние на показатель фактора износа при экспериментах на машине трения.

Материалы и методы. Для ультразвуковой обработки смазочного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 использовался высокочастотный излучатель Т251.4 (8...17 кГц) и ванна ультразвуковой очистки Ya Xun 3560 (43 кГц) в диапазоне мощностей 25—50 Вт. Триботехнические испытания проводились на машине трения 2070 СМТ-1М по схеме «ролик—колодка» (ролик — сталь Х12Ф1 ГОСТ 5950–2000, колодка — чугун СЧ-21 ГОСТ 1412–85) в соответствии с требованиями ГОСТ 23.224–86. Определялись коэффициент поверхностного натяжения и температура смазочного масла при воздействии на него ультразвука, а также предзадирная и оптимальная нагрузки, локальный минимум коэффициента трения при оптимальной нагрузке в условиях минимального коэффициента поверхностного натяжения.

Результаты и их обсуждение. При испытаниях на прирабатываемость постепенно увеличивалась нагрузка на «колодку» с шагом 0,1 кН до максимальной предзадириной нагрузки, далее — снижалась, и определялась оптимальная нагрузка, при которой коэффициент трения был минимален. Вычислялись значения линейного износа образца, интенсивности изнашивания подвижных и неподвижных образцов пар трения и показатель фактора износа (рис. 1).

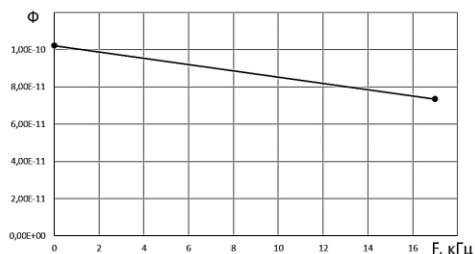


Рис. 1. Изменение показателя фактора износа Φ на частоте 17 кГц

Зафиксировано снижение коэффициента поверхностного натяжения в зависимости от частоты ультразвука (рис.2), а также эффект длительной сохранности данного эффекта (рис.3).

Проведенные исследования позволяют сформулировать нижеследующие выводы.

1. Анализ изменения показателя фактора изно-

са в зависимости от частоты обработки смазочного масла показал, что, скорее всего, связано со снижением коэффициента поверхностного натяжения смазочного масла, облегчающего формирование масляного клина между контактирующими поверхностями.

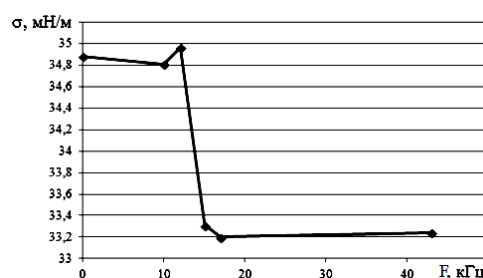


Рис. 2. Изменение коэффициента поверхностного натяжения масла от частоты ультразвукового излучателя

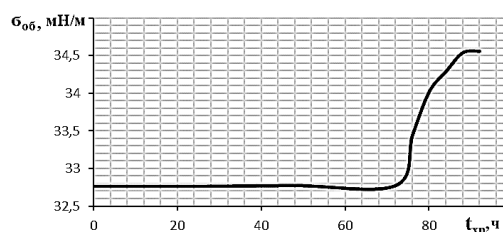


Рис.3. Изменение коэффициента поверхностного натяжения от времени, прошедшего с момента окончания обработки

2. Частота 17 кГц и мощность 25 Вт излучателя достаточны для снижения коэффициента поверхностного натяжения на максимально зарегистрированное значение 5,21%, при этом их дальнейшее увеличение не приводит к существенным изменениям его значений.

3. Снижение коэффициента поверхностного натяжения смазочного масла наблюдается в диапазоне 20...60 с, а дальнейшее его понижение связано, в основном, с нагреванием масла от излучателя.

4. Эффект «низкого» коэффициента поверхностного натяжения наблюдается в течение 72 часов, что позволяет только периодически обрабатывать масло.

1. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на эффективность технологических смазок / Б. С. Каргин [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. 2015. № 30-1. С. 136—140.
2. Виброакустические испытания образцов трибосопряжения на износостойкость / Ефремов Л.В. [и др.] // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 2. С. 69—79.
3. Обработка смазочного масла ультразвуком при проведении триботехнических испытаний / А. А. Симдянкин [и др.] // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 4. С. 311—315.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЯДА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОМПОЗИЦИЯХ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ РАЗЛИЧНОГО СТРОЕНИЯ

А.С. Парфенов¹, Е.В. Берёзина², А.И. Смирнова², А.А. Гвоздев³, Т.П. Дьячкова⁴,
Н.Н. Рожкова⁵, С.В. Савилов⁶, Н.В. Усольцева²

¹Ивановская государственная медицинская академия, Иваново, Россия

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия; nv_usoltseva@mail.ru

³Ивановская государственная сельскохозяйственная академия, Иваново, Россия

⁴Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

⁵Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Целью работы было установление влияния типа и концентрации углеродных наноструктур (УНС) на коэффициент трения и задиристость их композиций с тремя промышленно выпускаемыми пластичными смазочными материалами (ПСМ) отечественного и импортного производства в пределах нагрузки от 0 до 180 Н для оптимизации их трибологических характеристик и возможности импортозамещения.

Материалы и методы: Исследованы три пластичных смазочных материала: импортный — Claas AGRIGREASE EP2 (**I**) и отечественные — Газпромнефть LX EP2 (**II**) и Литол-24 (**III**). В качестве основы модельных смазочных систем использован вазелин медицинский (**VM**).

Углеродные наноструктуры: графен многослойный окисленный (Gr), одностенные (SWNT) и многостенные (MWNT) углеродные нанотрубки, наночастицы шунгитового углерода (Sh).

Образцы смазочных систем готовились механическим перемешиванием ПСМ с добавками УНС (концентрации 0,5, 1,0 и 1,5 мас.%).

Трибологические исследования проводились на универсальной машине трения МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004). Пара трения: «палец — диск». Материал пары трения закаленная сталь 40Х. Условия трения: частота вращения шпинделя — 200 об/мин, скорость скольжения — 11,3 м/мин, диапазон нагрузок — от 0 до 180 Н.

Результаты и их обсуждение:

Исследование влияния различных типов УНС: одностенных (SWCN) и многостенных (MWCN) нанотрубок, многослойного окисленного графена (Gr) и наночастиц шунгитового углерода (Sh) в концентрациях 0,5, 1 и 1,5 мас.% на коэффициент трения и задиристость трех ПСМ: импортного Claas AGRIGREASE EP2 (**I**) и отечественных — Газпромнефть LX EP2 (**II**) и Литол-24 (**III**), — показало:

1) повышение концентрации добавки УНС от 0,5 до 1,5 мас.% не оказывает существенного влияния на значения коэффициента трения всех исследованных систем, поэтому концентрацию 0,5 мас.% можно считать оптимальной, как с технической, так и с экономической точек зрения;

2) добавление в отечественные ПСМ **II** и **III** всех типов исследованных УНС в изученных концентрациях приводит к повышению задиристости композиций;

3) тип базового ПСМ и величина нагрузки оказывают влияние на свойства изученных композиций. Введение всех типов УНС в импортный ПСМ **I** при всех исследованных нагрузках в целом приводит к повышению коэффициента трения систем (исключением является понижение коэффициента трения в системах с одностенными нанотрубками при нагрузках до 80 Н).

В системах ПСМ **II** с углеродными нанотрубками при нагрузках 60 и 110 Н коэффициент трения повышается по сравнению с исходным **II**. Проявление этого эффекта у систем **II**/SWCN существеннее, чем у **II**/MWCN. Введение Gr и Sh практически не влияет на коэффициент трения по сравнению с исходным ПСМ **II**. При повышении нагрузки до 160 Н коэффициент трения возрастает, но его количественный показатель практически не зависит от типа УНС.

Введение в отечественную ПСМ **III** всех типов УНС уменьшает коэффициент трения при нагрузках 60 и 110 Н, а при нагрузках свыше 160 Н по значениям коэффициента трения приближает композицию **III**/SWCN к импортному ПСМ **I**.

Анализ данных коэффициента трения при нагрузке 160 Н, позволил построить следующие ряды по убыванию коэффициента трения:

для ПСМ **I** — SWCN>MWCN>Gr>Sh,

для ПСМ **II** — SWCN≈MWCN≈Gr≈Sh,

для ПСМ **III** — Sh>Gr>MWCN>SWCN;

4) в модельных условиях как сам вазелин, так и системы **VM**/MWCN и **VM**/Gr не достигают нагрузки 160 Н в связи с проявлением задира. В отличие от этого добавка SWCN и Sh, приводит к исчезновению задира в пределах исследованных нагрузок. При этом коэффициент трения в системах **VM**/SWCN больше, чем в **VM**/Sh.

Благодарности. Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-19150_мк) и программой Минобрнауки РФ (грант № 16.1037.2017/4.6).

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

М.А. Шилов^{1,5,6}, А.И. Смирнова¹, А.А. Гвоздев², Н.Н. Рожкова³, Т.П. Дьячкова⁴,
А.А. Бурков⁵, Н.В. Усольцева¹

¹Ивановский государственный университет, Иваново, Россия; Mshilov@yandex.ru

²Ивановская государственная сельскохозяйственная академия, Иваново, Россия

³Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

⁴Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

⁵Вятский государственный университет, Киров, Россия

⁶Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

Введение. В современных реалиях экономики переход к импортозамещению наблюдается во всех отраслях. Это касается и машиностроения, одной из задач которого является создание смазочных материалов (СМ), не уступающих по характеристикам импортным аналогам. Изучение реологических характеристик СМ позволяет расширить теоретические знания о возможности прогнозирования и регулирования трибологических свойств смазочных композиций [1]. Исследования кривых течения могут служить в качестве средства оценки внутренней структуры смазочной композиции, выявления и регистрации изменений этой структуры.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы был анализ реологических характеристик промышленных ПСМ и установление возможности их оптимизации за счет введения различных углеродных наноструктур (УНС) для улучшения трибологических показателей отечественных ПСМ в условиях импортозамещения. В ходе исследований решались следующие задачи:

- установление особенностей влияния различных типов и концентраций УНС в качестве присадок к ПСМ на вязкость в условиях сдвигового теста;
- установление особенностей влияния типа УНС и частоты сдвига на характер вязкоупругого течения изучаемых ПСМ в условиях осцилляционного теста: G^* — комплексный модуль сдвига, G' — упругую (модуль накопления) и G'' — вязкую (модуль потерь) составляющие комплексного модуля сдвига.

Материалы и методы. В работе были исследованы реологические свойства трех промышленно выпускаемых ПСМ: импортного Claas AGRIGREASE EP2, а также отечественных Газпромнефть LX EP2 и Литол-24). Выбор их основывается на том, что из исследованных нами ранее шести ПСМ (трех импортных и трех отечественных) [2], Claas AGRIGREASE EP2 показал наилучшие трибологические характеристики из импортных, а Газпромнефть LX EP2 и Литол-24 из отечественных ПСМ.

В качестве наноприсадок вводились различные УНС (с концентрацией 0,5 и 1 мас.%): графен многослойный окисленный (Gr), одностенные (SWNT) и многостенные (MWNT) углеродные нанотрубки, наночастицы шунгитового углерода (Sh).

Результаты и их обсуждение. Данные двух независимых тестов (сдвигового и осцилляционного) для отечественных ПСМ с УНС находятся в хорошем соответствии друг с другом, что свидетельствует о достоверности впервые сделанного вывода о влиянии пространственной структуры аллотропов углерода на реологические свойства исследованных систем. Этот вывод является фундаментальной основой для управления реологическими свойствами отечественных ПСМ.

Установленное в реологическом эксперименте резкое снижение упругих свойств систем при введении многослойного окисленного графена в концентрации 0,5 мас.% может свидетельствовать о разрушении каркаса загустителя ПСМ. Эксплуатация таких смазочных материалов будет сопровождаться подтеканием базового масла в зоне контакта, поэтому они могут быть использованы только в закрытых узлах трения. Экспериментальные результаты, полученные для всех остальных исследованных систем, могут служить основой для проведения дальнейших трибологических испытаний по оптимизации составов ПСМ в узлах трения как закрытого, так и открытого типа.

Благодарности. Работа поддержана программой Минобрнауки РФ «Наука будущего» (№ 16.1037.2017/4.6) и грантом РФФИ (№ 18-29-19150 мк).

1. Radulescu A.V. and Radulescu I. Rheological models for lithium and calcium greases // *Mechanika*. — 2006 (59), no. 3, 67—70.
2. Гвоздев А.А., Смирнова А.И., Березина Е.В., Дунаев А.В., Ткачев А.Г., Усольцева Н.В. Исследование триботехнических характеристик перспективных смазочных материалов с углеродными наночастицами // *Жидк. крист. и их практич. использ.* — 2018 (18), № 1, 66—72.

ТРАНСМИССИОННОЕ МАСЛО ДЛЯ ХВОСТОВОГО РЕДУКТОРА ВЕРТОЛЁТА

И.В. Колесников, М.В. Бойко, А.П. Сычев

Ростовский государственный университет путей сообщений, Ростов-на-Дону, Россия; mikle-1@list.ru

Развитие современной техники предъявляет повышенные требования к эксплуатационным свойствам смазочных материалов, которые должны обеспечивать безотказную работу узла трения, в том числе в широком температурном диапазоне [1].

В настоящее время в России применяются в основном отечественные авиационные масла II поколения. В то же время для современной авиатехники рекомендованы масла III поколения на базе синтетических смазывающих основ [2].

Производства современных типов масел, обладающих улучшенными низкотемпературными свойствами, базируются на синтетических видах базовых основ. Среди современных синтетических масел особое место занимают масла на основе сложных эфиров. Эти масла обладают высокими смазывающими свойствами, за счет полярности молекул они хорошо адсорбируются на телах трения, чем способствуют минимальному коэффициенту трения. Для производства авиационных синтетических смазочных материалов используются эфиры пентаэритрита, обладающие высокой термической и термоокислительной стабильностью, хорошими вязкостными свойствами при низких температурах, высоким индексом вязкости и низкой летучестью. Регулирование вязкости сложных эфиров пентаэритрита обычно производят на стадии их синтеза [3]. Такой технологический прием обусловлен тем, что товарные вязкостные присадки для минеральных масел не применимы для модификации вязкости эфиров пентаэритрита ввиду своей плохой растворимости в данных смазочных материалах.

Цель исследования — разработка экологически чистого трансмиссионного масла для хвостового редуктора вертолёт на основе синтетических сложных эфиров пентаэритрита.

Материалы и методы. Температуру застывания определяли по ГОСТ 20287–91. Кинематическую вязкость определяли по ГОСТ 33–2000. Трибологические испытания на четырёхшариковой машине трения проводили по ГОСТ 9490–75.

В качестве базового масла мы использовали Турбоникойл 98 (СМ 1).

В качестве вязкостных присадок использовали касторовое масло, имеющее кинематическую вязкость при 100 °С равную 19,7 мм²/с (присадка 1); осернённое касторовое масло, содержащее 5% серы, с кинематической вязкостью при 100 °С равной 59,08 мм²/с (присадка 2); и осернённое касторовое масло, содержащее 10% серы, с кинематической вязкостью при 100 °С в пределах 100 ÷ 130 мм²/с (присадка 3).

Результаты и их обсуждение. Нами изучены некоторые физико-химические свойства исходного масла Турбоникойл 98 и масел, модифицированных присадками 1—3, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты определения физико-химических свойств исходного и модифицированных трансмиссионных масел

Состав смазочного материала	Физико-химические показатели		
	Температура застывания, °С	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	Диаметр пятна износа, мм
СМ 1: Турбоникойл 98	–66	7,00	0,61
СМ 2: 85% Турбоникойл 98 + 15% присадки 1	–55	9,53	0,68
СМ 3: 85% Турбоникойл 98 + 15% присадки 2	–53	10,27	0,33
СМ 4: 70% Турбоникойл 98 + 30% присадки 2	–45	13,21	0,44
СМ 5: 85% Турбоникойл 98 + 15% присадки 3	–59	14,71	0,36

Наибольшее влияние на кинематическую вязкость оказала присадка 3, добавление которой в количестве 15% позволило более чем в 2 раза увеличить вязкость при 100 °С исходного масла. При этом температура застывания модифицированного масла повысилась всего на 10% по сравнению с маслом Турбоникойл 98. Добавление присадки 3 улучшает трибологические свойства модифицированного масла диаметр пятна износа снижается почти в 2 раза.

Благодарности. Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы” при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования России (идентификатор проекта RFMEFI60718X0203).

1. Заглядова С.В., Шабалина Т.Н., Китова М.В., Маслов И.А., Кашин Е.В. Арктические смазочные материалы и технологии их получения // Научно-технический вестник ОАО “НК “РОСНЕФТЬ”. — 2015, № 4, 60—67
2. Яновский Л.С., Езов В.М., Молоканов А.А. Нормативные требования к отечественным и зарубежным смазочным маслам для авиационных газотурбинных двигателей // Вестник МАИ. — 2012 (19), № 4, 81—85
3. Eychenne V., Mouloungui Z. Relationships between structure and lubricating properties of neopentylpolyolesters // Ind. & Eng. Chem. Research. — 1998 (37), 4835—4843

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РАБОТЫ В СРЕДЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ КОНТРТЕЛА

С.Н. Бухаров, А.Я. Григорьев, В.П. Сергиенко

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

Введение. Вибрация, «дергания», динамический удар при срабатывании фрикционных устройств, связанные с процессами диссипации и передачи механической энергии в машинах, представляют собой важную экономическую и техническую проблему в промышленности [1]. В маслоохлаждаемых фрикционных узлах, например, в «мокрых» муфтах и тормозах, несмотря на присутствие жидкой смазки, пиковые уровни акустического шума, возникающего в момент их включения, могут достигать более 120 дБА. К числу основных факторов влияющих на динамическую нестабильность этих устройств относят свойства смазочного масла и добавок, температурный диапазон эксплуатации и шероховатость фрикционно-взаимодействующих твердых тел [2]. Известные работы по влиянию шероховатости поверхностей трущихся твердых тел на триботехнические процессы в основном не затрагивают вопросы виброакустики. Подавляющее число публикаций, посвященных проблемам шума и вибрации в тормозах и трансмиссиях, касаются средне- и высокочастотных явлений в системах с трением без смазочного материала, в то время как проблема низкочастотных фрикционных автоколебаний маслоохлаждаемых фрикционных устройств остается практически не раскрытой в технической литературе.

В настоящей работе проведены исследования процессов перехода от трения покоя к трению скольжения в среде жидкого смазочного материала с целью выявления общих закономерностей влияния шероховатости контактной поверхности стального контртела на скорость изнашивания, коэффициенты статического и динамического трения для фрикционных композиционных материалов различного состава. По результатам исследований предложена методика комплексного экспресс-анализа триботехнических и виброакустических характеристик фрикционных материалов на образцах малых размеров с применением возвратно-поступательной кинематической схемы.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования выбраны коммерческие фрикционные материалы, широко применяемые в различных конструкциях маслоохлаждаемых тормозов и автоматических трансмиссий автотракторной техники, а также модельные составы композитов на основе органических связующих. Выбор материалов осуществлялся по типу полимерного связующего, волокнистых и дисперсных наполнителей. В качестве поли-

мерной матрицы в составах исследованных композитов использовался нитрильный каучук (НК) и смесь НК и фенолформальдегидной смолы резольного типа (ФФС). В качестве волокнистого наполнителя — целлюлозосодержащие и углеродные волокна, а в качестве дисперсных наполнителей — оксиды кремния и переходных металлов.

В работе предложена экспресс-методика испытаний, позволяющая получать адекватные данные о виброакустических и триботехнических характеристиках фрикционных материалов при трении в масле. Общим условием существования фрикционных автоколебаний считается падающий вид кинетической и возрастающий вид статической характеристики трения. Определение ключевых триботехнических характеристик, влияющих на низкочастотную динамическую нестабильность маслоохлаждаемых фрикционных устройств проведено на приборе Rtec Instruments (США). В приборе реализована кинематическая схема трения «плоскость — плоскость» при линейном возвратно-поступательном (циклическом) скольжении в среде жидкого смазочного материала.

Результаты и их обсуждение. Экспериментально подтверждено наличие оптимальной шероховатости, соответствующей наименьшей интенсивности изнашивания фрикционных композитов в среде жидкой смазки. Показано, что различные по составу и структуре композиты, отличающиеся типом полимерной матрицы и волокнистых наполнителей, имеют различную "чувствительность" (отклик на изменение) к шероховатости контртела. При этом для неизменных режимов и условий трения минимальные значения показателей динамической нестабильности и износа находятся в одном диапазоне высот неровностей и практически не зависят от состава фрикционных материалов. Полученные в настоящей работе зависимости линейной скорости изнашивания, коэффициентов статического и динамического трения контртела имеют немонотонный характер с общим локальным минимумом в диапазоне шероховатости контртела 1,25...4,0 мкм для исследуемых материалов.

1. Сергиенко В.П. Вибрация и шум в нестационарных процессах трения / В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров. — Минск: Беларуская навука, 2012. — 348 с.
2. Григорьев, А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А.Я. Григорьев. — Минск: Беларуская навука, 2016. — 247 с.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСНОЙ КАЛЬЦИЕВОЙ СМАЗКИ

А.Л. Богданов

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

В современной технике применяется широкий ассортимент пластичных смазок, при этом значительная доля принадлежит смазкам на основе комплексных загустителей. Несмотря на широкое распространение в настоящее время литиевого комплекса, сохраняется спрос и на комплексные кальциевые смазки, которые могут быть дешевой альтернативой литиевому комплексу в связи с тенденцией роста потребления лития на производство аккумуляторов.

Часто для повышения качества, а также для получения особых свойств смазок в их рецептурах используют различные добавки, присадки и наполнители. Это могут быть как твердые минералы, так и широкий спектр органических соединений — модификаторов структуры. Многие ПАВ или неорганические соединения, применяемые в качестве таких добавок достаточно дорогостоящие, либо применимы только в ограниченных условиях. Особый интерес представляет использование в качестве добавок к смазкам полимерных материалов, которые в настоящее время широко распространены в том числе в триботехнике. Следует отметить, что в определенных условиях некоторые полимеры могут выступать также в качестве аварийной смазки [1, 2].

Цель. Исследование влияния полимерных наполнителей на реологические и триботехнические характеристики комплексной кальциевой смазки

Материалы и методы исследования. Объект исследования пластичная смазка на основе комплексного кальциевого загустителя. В качестве полимерных наполнителей использовали: фторопласт-4, полиэтилен высокого давления, полиуретан, полиизобутилен, полиамид-6.

Для исследований готовили образец смазки по стандартной технологии без добавок [3], а также образцы смазки с добавлением полимера.

Полученные образцы исследовали по стандартным методикам, а также с использованием расширенной методики на ЧШМ.

Результаты и их обсуждение. Результаты испытаний образцов смазок на предмет их реологических и триботехнических характеристик приведены в табл. 1.

Установлено, что полимерные добавки оказывают значительное воздействие на структуру пластичной смазки на основе комплексного кальциевого загустителя, что подтверждается изменением их реологических характеристик, при этом наибольшее влияние оказывает добавка полиуретана, наимень-

шее фторопласта-4.

В среднем пенетрация снижается на 7—13%. Коллоидная стабильность образцов смазок улучшается в среднем на 15—30%. Полимерные добавки снижают термоупрочнение смазки до значений 85—47%.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов смазок

Характеристика		Смазка без доба- вок	Фторопласт-4	Полиэтилен вы- сокого давления	Полиуретан	Полиизобутилен	Полиамид 6
Предел прочности на сдвиг, Па при T, °C	20	441	443	471	547	517	448
	50	422	349	408	513	406	344
	80	415	305	424	483	349	312
Температура каплепадения, °C		240	240	240	240	240	240
Коллоидная стабильность, %		16,2	13,9	12,9	11,4	11,9	13,6
Пенетрация при 25 °C, мм*10 ⁻¹		320	297	285	278	290	321
Термоупрочнение, %		630	84	67	47	75	67
ЧШМ, 1ч		0,90	0,59	0,66	0,77	0,64	0,61
ЧШМ, 8ч		1,14	0,85	0,71	1,07	1,27	0,65

При оценке триботехнических характеристик на ЧШМ установлено, что добавки полимеров снижают диаметр пятна износа в среднем на 8.3%. Установлен эффект снижения износа для добавки полиамида 6 на 43%, для полиэтилена высокого давления на 38%, для фторопласта-4 на 25%. Добавка полиуретана снижает износ на 6%. Полиизобутилен вызывает повышение износа на 11%.

Таким образом, приведенные данные подтверждают перспективность использования полимерных наполнителей с целью повышения эксплуатационных качеств в составе комплексной кальциевой смазки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т18М-034).

1. Фуке И.Г. Добавки к пластичным смазкам. — М.: Химия. — 1982
2. Зарубежные масла, смазки, присадки и их отечественные аналоги: Международный каталог / И.Н. Якунина, Н.В. Орлова. — М.: Международная академия информатизации при ООН. — 1996
3. Ишук Ю.Л. Состав и свойства пластичных смазок. — М.: Наукова Думка, Киев. — 1996

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ И МИНЕРАЛЬНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.Г. Чмыхова¹, А.В. Тимошенко², С.Ф. Ермаков³, Л.И. Коваль⁴

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; mazur9080@yandex.ru)

²Локомотивное депо, Гомель, Беларусь

³Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

⁴Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины, Киев, Украина

Решение экологических проблем современности требует поиска альтернативных источников сырья и энергии. В области использования воспроизводимого сырья ведущая роль принадлежит биоресурсам, прежде всего масличным с/х культурам, поскольку растительные масла являются вполне приемлемой альтернативой нефтяному сырью для производства смазочных материалов (СМ). С технико-экономических и экологических позиций наиболее приемлемым для указанных целей является рапсовое масло (РМ) (для умеренной климатической зоны, какой является Беларусь) [1].

Использование экологически чистых СМ актуально и для железнодорожного транспорта в системе «колесо—рельс», где возможно проникновение использованного СМ непосредственно в почву [2].

Цель. Исследование триботехнических свойств смазочных материалов на основе РМ и определение возможности их использования на железнодорожном транспорте.

Материалы и методы. В качестве объектов исследований выбрана разработанная экологически чистая смазка «ЭЧС-1» на основе РМ (ТУ ВУ 400084698.311–2018) и серийно выпускаемые СМ на основе минеральных масел («АКС-РЕЛЬСОЛ», «АКС-АГС» и др.), широко используемые в настоящее время на железнодорожном транспорте для рельсо- и гребнесмазывания.

Триботехнические свойства исследуемых СМ оценивали на ЧШМ в соответствии с ГОСТ 9490–75 при нагрузке 392 Н и 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 оценивали на оптическом микроскопе «NU-2».

Кроме того, оценку эффективности защитного и смазочного действия разработанной смазки «ЭЧС-1» на растительной основе в сравнении со смазкой на минеральной основе «АКС-АГС» проводили и в реальных условиях. Исследуемые смазки во время движения локомотивов серии М62 на кривых участках рельсового пути подавались на гребни первой и последней по ходу движения колесных пар. Через каждые 25—28 дней в локомотивном депо при проведении технического обслуживания контролировалась толщина бокового гребня всех колесных пар локомотива и определялся их износ.

Результаты и их обсуждение. Нагрузка 1627 Н выбрана исходя из возможностей установки трения СМТ-1 и приближена к реальному контактному напряжению по Герцу-Беляеву [3]. Учитывая все параметры и показатели системы «ролик—ролик» и «колесо—рельс», рассчитали контактное напряжение σ . Оно равно 0,75 ГПа и 0,93 ГПа

соответственно. Это показывает, что результаты испытаний на машине трения СМТ-1 на паре трения «ролик—ролик» можно в приближении сравнивать с натурными испытаниями в системе «колесо—рельс».

Сравнительные лабораторные испытания показали значительное превосходство смазки «ЭЧС-1» перед серийно выпускаемыми СМ на минеральной основе «АКС-АГС» и «АКС-РЕЛЬСОЛ» по триботехническим характеристикам (табл. 1).

Отсюда видно, что «ЭЧС-1» обеспечивает более низкие износ сопрягаемых твердых тел и температуру в зоне трения, тем самым, подтверждая более эффективные защитное и смазочное ее действие. Последнее подтверждено при испытаниях этих СМ на ЧШМ (табл. 2).

Таблица 1. Результаты испытаний исследуемых СМ при фрикционном взаимодействии роликов из колёсной и рельсовой сталей на установке трения СМТ-1

Наименование смазок	Износ роликов за 16 ч, г		Коэффициент трения	Температура в зоне трения, °С
	колесного	рельсового		
ЭЧС-1	0,0003	0,0023	0,055	59
АКС-АГС	0,0249	0,0688	0,09—0,1	79
АКС РЕЛЬСОЛ	0,0003	0,0077	0,082	73

Таблица 2. Результаты испытаний СМ на ЧШМ

Наименование смазок	Средний диаметр износа шариков, мм / температура в зоне трения, °С: при испытаниях, час	
	1	8
ЭЧС-1	0,39 / 47	0,50 / 48
АКС-АГС	0,48 / 59	0,57 / 91
АКС РЕЛЬСОЛ	0,51 / 51	0,64 / 79

Испытания указанных СМ в реальных условиях убедительно подтвердили полученные результаты. Установлено, что при натуральных испытаниях разработанной смазки на тепловозе М62 в течение 3-х месяцев, в системе гребнесмазывания которого использовалась экспериментальная экологически чистая смазка «ЭЧС-1», износ гребней колес тепловоза оказался на 12% ниже, чем износ гребней колес на тепловозе, который эксплуатировался со стандартной смазкой «АКС-АГС» на минеральной основе.

- Остриков В.В., Тупотилов Н.Н., Корнев А.Ю., Зимин А.Г. Растительные масла как основа для получения и использования аналогов смазочных материалов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2010, №5, 11–13
- Марков Д.П. Работоспособность колесно-рельсовых смазочных материалов // Трение и износ. — 2000 (21), № 5, 544—550
- Справочник по сопротивлению материалов / под ред. Г.С. Писаренко. — 2-е изд. — Киев, Наук. думка, 1988. — 736 с

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF METAL SURFACES IN TRIBO-PAIR, DEPOSITED BY Mo, BRONZE AND Ti-Al-C ALLOY USING ELECTRO-SPARK METHOD

M. Rukanskis¹, J. Padgurskas²

Vytautas Magnus University, Akademija, Kaunas district, Lithuania, e-mail: rukanskis@gmail.com

The purpose of work. To investigate metal surface deposited by Mo, Bronze and Ti-Al-C alloy using electro-spark deposition method, mechanical and tribological properties of tribo-pair.

Method of study. To create the coatings, we selected the ESD method, which is based on the phenomenon of the polar transport of the anode material (the treating electrode) on the cathode (substrate-part), when electrical discharge pulses in the gas medium appear between them [1, 2, 3]. The ESD method possesses a series of advantages compared with bulk and other surface alloying methods. It allows us to create coatings of any conductive materials and alloys, does not require the preliminary thorough surface preparation, and makes it possible to treat separate parts of ready constructions; the part is not heated during alloying. The passing current causes the additional diffusion of coating elements inside the sample. Electrode materials interact between one another in the spark discharge channel under the effect of high temperatures and pressures with the formation of solid solutions and intermetallic compounds. The installation layout is shown in Fig. 1

The experiment procedure. Electro-spark alloying was performed in the Institute of applied physics in Chisinau, Moldova, using an EFI-10M industrial installation (Moldova) under the modes with energy of electric pulses of 0.7—2.0 J. Rods made of Mo, bronze, Ti, Al and C 50-60 mm in length with a diameter of 5 mm were used as treating electrodes. Three types of specimens were produced: Mo on C45, Bronze on C45 and Ti+Al+C alloy on C45. Tribological tests will be performed at the Tribology Laboratory of the Vytautas Magnus University, Agriculture academy (Akademija, Kaunas r., Lithuania) using an SMC-2 modernized friction machine (Russia). The test layout is shown in Fig. 2. Samples for investigations in the form of segments with electric-spark coatings operated in a pair with discs made of steel C45 (HRC 42—46). The samples will be tested in 10W-40 motor oil under two different loads and a friction path of 30 km.

Result and discussion. Partial results of the tribological tests will be presented during the conference POLYCOMTRIB-2019.

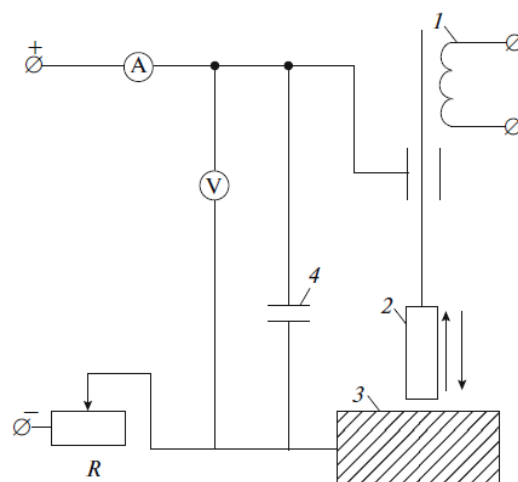


Fig. 1. Layout of electro-spark alloying: (1) electromagnetic vibrator, (2) electrode, (3) substrate-treated part and (4) capacitor

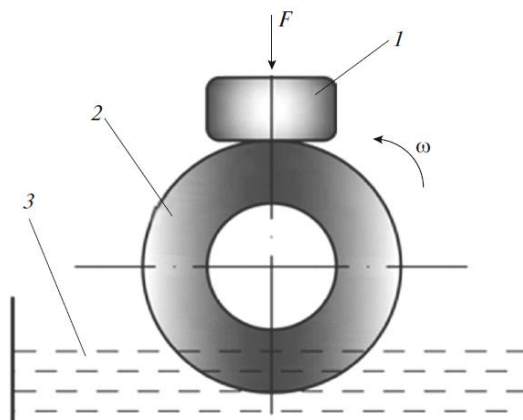


Fig. 2. Layout of tribological testing: (1) segment, (2) disc and (3) oil bath; F is the normal load and ω is the rotation direction of the disc.

1. Surface modification of resistance welding electrodes by electro-spark deposited composite coatings. Part II. Metallurgical behavior / Chen, Zh. and Zhou, Y., Surface and Coating Technology, 2006, vol. 201.
2. Elektroiskrovnoe legirovanie metallicheskich poverkhnostei (Electric-Spark Doping of Metals Surface) / Gitlevich, A., Mikhailov, V.V., Parkanskii, N.Ya., Petrov, Yu.N., Ed., Chisinau: Shtiintsa, 1985.
3. Effektivnost' obrabotki detalei metodom nakatyvaniya (The Efficiency of Rolling Treatment of the Parts) / Pyatosin, E.I. and Volchuga, V.V., Minsk: Bel. Nauchno- Issled. Inst. Nauchno-Tekh. Inform. Tekhn.-Ekon. Issled., 1982.

НОВЫЕ ТЕМПЕРАТУРОСТОЙКИЕ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.В. Алисин, М.Н. Роцин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vva-imash@yandex.ru

Проблемы, обусловленные перспективными работами в области изучения окосолнечного пространства и обеспечения работоспособности долгоживущих автоматических станций на поверхности Венеры, требуют создания новых материалов триботехнического назначения способных работать при повышенных температурах в условиях открытого космоса и агрессивной среде атмосферы планеты. Поэтому актуальным является исследование влияния температуры на антифрикционные свойства углерод-углеродных материалов нового поколения, которые отличаются малым удельным весом и высокими прочностными свойствами. Практический интерес представляют в основном композиционные материалы с повышенной стойкостью к воздействию высоких температур.

Цель работы — изучить влияние повышенной температуры (300—800 °С) на коэффициент трения перспективных углерод-углеродных материалов в условиях скольжения без смазки по стали 40Х13.

Материалы и методы. Объект исследования: — объемно-армированные углерод-углеродные композиционные материалы марки «Арголон-2D», производства ОАО «Композит». Благодаря своим структурным особенностям материал УУКМ представляет большой интерес при создании узлов трения. УУКМ содержит углеродный или кремнеземный армирующий элемент в виде дискретных волокон. Достоинствами УУКМ являются малая плотность (1,3—2,1 т/м³); высокие теплоемкость, сопротивление тепловому удару, эрозии и облучению; низкие коэффициенты трения (в диапазоне температур 20...300 °С) и линейного расширения; высокая коррозионная стойкость; широкий диапазон электрических свойств (от проводников до полупроводников); высокие прочность и жесткость. Уникальной особенностью УУКМ является увеличение прочности в 1,5—2,0 раза и модуля упругости при повышении температуры.

Для трибологических испытаний был изготовлен высокотемпературный стенд ВТМТ-1000, обеспечивающий режим трения образцов по пальчиковой схеме в интервале температур 20—700 °С в условиях диапазона нормальных нагрузок 35—500 Н. С учетом термоизоляции узел нагрева позволяет разогревать испытуемые образцы до температуры 1000 °С (рис. 1.). В состав установки входят: 1 — испытуемые образцы; 2 — верхний прижимной диск; 3 — нижний нагреваемый диск; 4 — нагреваемая плита с закрепленной термопарой; 5 — устройство измерения момента трения; 6 — контрольная термопара; 7 — упорный подшипник; 8 — система водяного охлаждения подшипника; 9 — привод стенда совмещенный с механизмом осевого нагружения; 10 — регулятор оборотов привода; 11 — держатель верхнего кольца; 12 — нагревательное устройство; 13 — регулятор напряжения нагревательного устройства.

Рис. 1. Блок-схема взаимосвязи узлов высокотемпературного стенда для испытаний образцов по пальчиковой схеме.

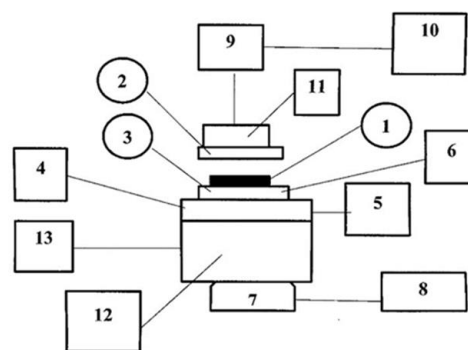


Рис. 1. Блок-схема взаимосвязи узлов высокотемпературного стенда для испытаний образцов по пальчиковой схеме.

Результаты и их обсуждение. При испытаниях УУКМ в паре со сталью 40Х13 в диапазоне температур 20...300 °С, нагрузке 0,22...1,0 МПа и скорости скольжения 0,16 м/с коэффициент трения с увеличением температуры падает, а в диапазоне температур 300...700 °С — возрастает. С увеличением нагрузки с 0,3 МПа до 1,0 МПа во всем температурном диапазоне 20...700 °С коэффициент трения падает. Результаты исследования приведены на рис. 2.

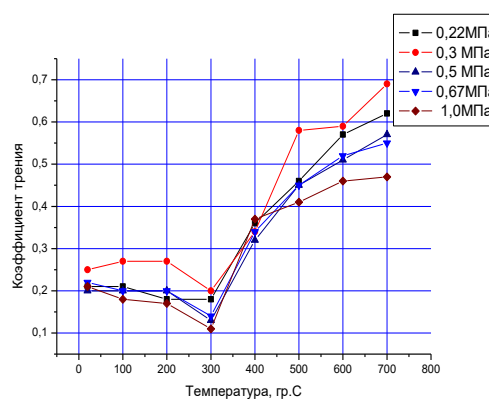


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения УУКМ по стали 40Х13 от температуры

Установлено, что коэффициент трения у покрытия Se-MoS₂ — политетрафторэтилен при температуре 700 °С и нагрузке 1,0 МПа составляет 0,212, что в 2,2 раза меньше, чем у УУКМ.

- Алисин В.В., Роцин М.Н., Лукьянов А.И., Воронцов В.А., Богачев В.А., Маркачев Н.А. Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 1/43. С. 61—65

**МЕХАНИЗМ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ
АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ — СТАЛЬ**В.Е. Бабич¹, А.М. Кузей²¹Университет гражданской защиты МЧС, Минск, Беларусь;²Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Принято считать, что низкая эффективность алмазобрабатывающего инструмента при обработке вязких материалов связана с графитизацией алмаза и специфическим механизмом фрикционного взаимодействия связки и алмаза со сталью, приводящим к переносу продуктов износа на поверхность связки и потере режущей способности инструмента.

Проблема алмазобрабатывающей обработки стали (резание крупногабаритных изделий), является актуальной. В работе изучены процессы, происходящие при резании пластин стали (Ст. 45) алмазными кругами (1A1R 300x3x4) с монокристаллами (АС-200, 500/400 мкм, 100 отн.%) и поликристаллами (АРС-3, 500/400 мкм, 100 отн.%) синтетического алмаза. Режущая способность кругов после 1, 3, 5 минут работы составила 11,7; 10,9; 8,2 г/мин и 10,3; 9,8; 9,1 г/мин. соответственно. После 3 и 5 минут работы форма сегментов изменилась, на поверхности монокристаллов появились сколы, магистральными трещинами было разрушено 11 и 18% монокристаллов, выкрошились из матрицы алмазосодержащего композиционного материала (сегмента) 3 и 9% монокристаллов. Сколы поверхности отмечены у 11 и 23% поликристаллов, магистральными трещинами разрушено 3 и 5%, выкрошились после 5 минут обработки 2% поликристаллов, на остальных образовались площадки износа, на поверхности которых присутствуют пленки из продуктов износа стали. На поверхности матрицы композиционных материалов возник бугристый микрорельеф с бороздами, ориентированными в направлении обработки (см. рис., а, б).

Морфологию поверхности стали формируют борозды, гребни со сглаженными вершинами, ориентированные в направлении обработки, на фоне которых расположены частицы продуктов износа

круглой, осколочной формы (см. рис., в, г), некоторые из которых морфологически связаны с поверхностью, что указывает на высокие (1700—1800 К) температуры в зоне фрикционного контакта. Снижение количества моно, поликристаллов алмаза на поверхности сегментов, морфология их поверхности, свидетельствует о динамическом, ударном характере контактного взаимодействия алмазосодержащих композиционных материалов со сталью. Присутствие частиц продуктов износа стали на поверхности моно, поликристаллов, борозды и гребни на поверхности стали, бугристый рельеф и борозды на поверхности матрицы, являются характерными признаками адгезионного и абразивного механизмов износа стали и матрицы композиционного материала.

Превалирующим механизмом износа стали при абразивной обработке, является множественное микрорезание при внедрении и перемещение граней, вершин, площадок зерен абразива (алмаза) в стали. Перемещение моно, поликристаллов в стали приводит к пластической деформации локальных участков поверхности, выделению тепла и разрушению поверхностного слоя на фрагменты (стружку). Увеличение температуры и пластичности поверхностного слоя подавляет процессы микрорезания и усиливает адгезионную составляющую изнашивания поликристаллов из-за снижения твердости алмазных зерен. Изнашивание стали происходит в результате деформации и частичного выдавливания пластичного приповерхностного слоя из зоны фрикционного контакта. Снижение режущей способности алмазосодержащего композиционного материала обусловлено изменением превалирующего механизма износа из-за увеличения температуры в зоне резания.



Рис. Морфология поверхности износа: а — матрицы композиционного материала; б — поликристалла; в, г — стали. Продолжительность обработки, минут: в — 3; а, б, г — 5

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин², И.В. Лавров²,
А.П. Сычев^{1,3}, А.А. Сычев¹, В.Б. Яковлев^{2,4}

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

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия;

³Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия; aleks_sap@mail.ru;

⁴Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

Целью работы является:

1) построение модели прогнозирования эксплуатационных (эффективных) упругих свойств многокомпонентных полимерных композитов фрикционного назначения, учитывающей состав, форму, ориентацию и концентрацию их компонентов;

2) проведение численного моделирования упругих свойств трибокомпозитов (модуля Юнга и коэффициента Пуассона), учитывающего изменения объемных содержаний включений.

Материалы и метод решения. Рассматриваются трибокомпозиты с включениями трех типов.

Тип 1 — равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения каучука.

Тип 2 — хаотически распределенные в пространстве композита рубленые короткие волокна БЦ-стекла.

Тип 3 — равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения минерального порошка, состоящего из поликристаллов глинозема, графита и барита (в отношении (по объему) 1 : 1 : 1).

Тип 4 (матрица) — эпоксифенольный состав на основе эпоксидной диановой смолы, отверждаемой малофенольной фенолформальдегидной смолой новолачного типа (с содержанием фенола менее 0,5%) в отношении 60 : 40 мас.ч. (изготовитель — ЗАО «ЭНПЦ Эпитал», г. Москва).

Моделирование опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [1, 2]. На основе полученного в работе соотношения для вычисления компонент тензора c^* эффективных модулей упругости для трибокомпозитов рассматриваемой структуры проведены исследования и расчеты влияния объемных концентраций v_s ($s=1,2,3,4$) элементов неоднородности на эксплуатационные упругие характеристики (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) композитов.

Результаты моделирования и их обсуждение. На рисунке приведены результаты численных расчетов значений модуля Юнга E^* и коэффициента Пуассона ν^* модельных полимерных фрикционных

композитов от изменения объемной концентрации v_2 волокон БЦ-стекла.

Моделирование показало, что увеличение концентрации волокон БЦ-стекла приводит к росту значений E^* и снижению значений ν^* . При этом изменения значений E^* и ν^* фрикционных композитов в диапазонах вариаций их объемных содержаний, используемых на практике, происходят по закону, близкому к линейному.

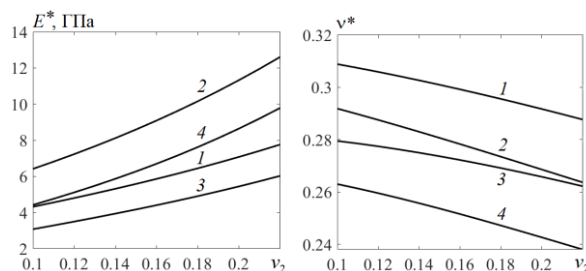


Рисунок. Изменение эксплуатационных упругих характеристик полимерных фрикционных композитов при увеличении объемного содержания v_2 волокон БЦ-стекла: 1 — $v_1=0,3$, $v_3=0,14$; 2 — $v_1=0,3$, $v_3=0,26$; 3 — $v_1=0,42$, $v_3=0,14$; 4 — $v_1=0,42$, $v_3=0,26$

Увеличение концентрации дисперсных включений каучука (v_1) приводит к снижению значений E^* , а добавок минерального порошка (v_3), наоборот, — к росту значений E^* . Увеличение объемной концентрации как каучука, так и минерального порошка приводит к снижению значений ν^* фрикционных композитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-08-00111-а)

1. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. — М.: Наука. — 1977
2. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Колесников И.В. Микромеханика поликристаллов и композитов. — Ростов-на-Дону: РГУПС. — 2012

МОНИТОРИНГ МИНИМАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ СМАЗЫВАЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ТРУЩИХСЯ СОПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ

В.Л. Басинюк¹, Р.Е. Волкотруб¹, М.П. Лобкова¹, А.Е. Ковенский²

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; Vladbas@mail.ru

²ОАО «Планар», Минск, Беларусь

Введение.

Величина минимального зазора между смазываемыми поверхностями во многом определяет характер трения (граничное или жидкостное) и, как следствие, вероятность возникновения схватывания и ресурс. Причем последний зависит от величины этого зазора в степенной функции и может способствовать его изменению в 2-3 и более раз [1]. Вместе с тем, контроль зазоров между смазываемыми поверхностями трущихся сопряжений высокоскоростных динамически нагруженных систем можно отнести к одному из наиболее технически сложных мероприятий.

Цель.

Разработка методических подходов к мониторингу минимальных зазоров между смазываемыми поверхностями трущихся сопряжений высокоскоростных динамически нагруженных систем на примере зубчатых передач.

Методы исследований.

Существует прямой и косвенный [3] методы контроля минимальных зазоров между смазываемыми поверхностями трущихся сопряжений высокоскоростных динамически нагруженных систем.

При использовании прямого метода контроля измерение минимальных зазоров осуществляется непосредственным измерением, например, падения напряжения тлеющего разряда, возникающего между наиболее близко расположенными точками поверхностей [2]. При этом между величиной зазора и падением напряжения тлеющего разряда существует практически линейная зависимость, параметры которой определяются тарировкой.

Для традиционных смазочных материалов результаты контроля не зависят от скоростей качения или скольжения, а также контактного давления, а влиянием иных факторов можно либо пренебречь, либо учесть при автоматизированной обработке.

Косвенный метод, например, по изменению виброакустических характеристик [3], существенно более удобен в использовании, но его использование позволяет, в большей мере, осуществить только качественную оценку усредненного зазора и его изменения в процессе эксплуатации. Кроме того, он наиболее эффективен для регистрации изменения условий трения, например при переходе от жидкостного к граничному трению.

С учетом этого, при исследованиях был использован первый метод, позволяющий осуществить

непосредственный контроль минимальных зазоров в трущихся сопряжениях.

Результаты и их обсуждение.

Пример регистрации минимальных величин зазора и толщины смазочной пленки в динамически нагруженном зубчатом сопряжении показан на рис. 1.

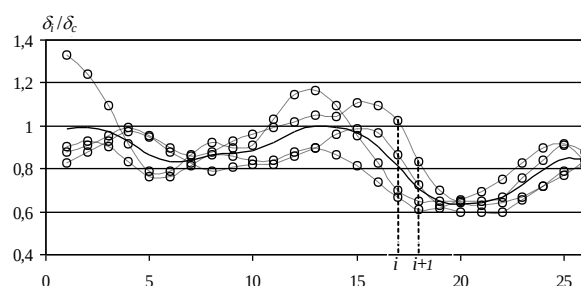


Рис. 1. Изменение отношения величин минимального зазора и толщины смазочной пленки от входа до выхода пары зубьев из зацепления

Анализ результатов исследований показал, что использование метода падения напряжения тлеющего разряда в масляной пленке позволяет осуществить эффективный контроль минимальных величин зазора в высокоскоростных динамически нагруженных трущихся сопряжениях (зубчатых передачах, подшипниках и направляющих скольжения и т.п.). Он может осуществляться постоянно или периодически, причем в сочетании с одновременным использованием виброакустического контроля эффективность системы мониторинга может быть существенно повышена. К наиболее рациональным областям применения данного методического подхода могут быть отнесены:

- оценка на стадии изготовления качества изготовления и сборки с уточненным прогнозированием ресурса сопряжения;
- автоматизированный мониторинг технического состояния трущегося сопряжения в эксплуатации;
- оценка соответствия марки и качества смазки реальным условиям функционирования трущегося сопряжения, а также деградация его свойств.

1. Петрусевич, А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. — М.: Изд-во АН СССР, ОН, 1951. — № 2. — С. 209-233.
2. Райко, М.В. Смазка зубчатых передач. — Киев: Техника, 1970. — 196 с.
3. Басинюк В.Л. Динамика, смазка и шум зубчатых передач. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2006. — 216 с.

МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ЗАЗОРАМИ В АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЕЙ

В.Л. Басинюк¹, Р.Е. Волкотруб¹, А.Е. Ковенский², С.С. Папина¹

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; Vladbas@mail.ru

²ОАО «Планар»

Введение.

Служебные свойства высокоскоростных электрошпинделей с аэростатическими подшипниками во многом определяются величиной и стабильностью зазора между валом и корпусом. При этом величины зазоров крайне малы и при возникновении колебаний вала вследствие импульсного силового воздействия на него внешней силой возникают колебания, которые могут приводить к непосредственному металлическому контакту поверхностей вала и корпуса электрошпинделя, их схватыванию и разрушению.

Эта проблема может быть успешно решена путем бесконтактного мониторинга положения вала относительно внутренней поверхности электрошпинделя и с его учетом активного управления процессом гашения этих колебаний.

К одному из перспективных направлений создания систем бесконтактного мониторинга можно отнести их формирование на базе системы контроля с датчиками Холла [1].

Цель исследований.

Разработка методических подходов к бесконтактному мониторингу на основе использования датчиков Холла зазоров в аэростатических подшипниках скоростных электрошпинделей.

Методы исследований.

При исследованиях использовался биполярный аналоговый датчик Холла SS495A, функционирующий при плотности магнитного потока от -67 мТл до $+67$ мТл и рабочем напряжении $U_{\text{раб}} = 4,5 \div 10,5$ В. Изменялось расстояние от его поверхности до постоянного магнита с одновременной регистрацией его показаний с использованием аппаратно-программных средств. Датчик Холла устанавливался напротив полюса постоянного магнита (ось X) и перпендикулярно ему (ось Y).

По результатам контроля определялись зависимость показаний ψ датчика Холла от расстояния Δ до постоянных магнитов.

Результаты и их обсуждение.

Изменение показаний датчика Холла условно можно разбить на три группы (рис.1):

- диапазон минимальных расстояний между датчиком Холла и постоянным магнитом, характеризующийся крайне малой чувствительностью системы контроля «датчик Холла–постоянный магнит», использование которого мало эффективно;
- средний, достаточно широкий, диапазон расстояний, между датчиком Холла и постоянным маг-

нитом, в котором чувствительность системы контроля «датчик Холла–постоянный магнит» наиболее высокая и между показаниями датчика Холла ψ и изменением расстояния Δ существует близкая к линейной эмпирическая зависимость:

$$\psi_x = k_1 + k_2 \Delta, \quad (1)$$

$$\psi_y = k_3 (\Delta - 1); \quad (2)$$

– диапазон пониженной чувствительности системы контроля.

Анализ результатов исследований показал, что в направлении оси Y , т.е. при расположении полюса магнита параллельно датчику Холла, чувствительность системы контроля, по меньшей мере, вдвое выше, чем в направлении оси X .

При этом, для повышения чувствительности системы, например до $0,2\text{--}0,5$ мкм, целесообразно дополнительное использование специализированных алгоритмов и программного обеспечения для обработки регистрируемых параметров.

Контроль положения вала электрошпинделя осуществляется с помощью ортогонально установленных на его корпусе датчиков Холла и размещенных на валу кольцевых постоянных магнитов. Последние могут быть использованы в системе активного управления колебаниями вала.

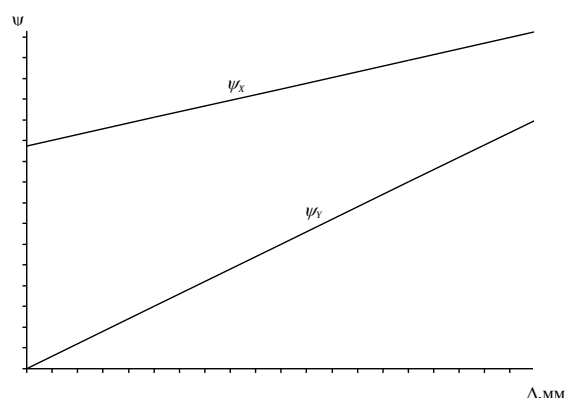


Рис.1. Зависимость изменения параметра ψ от расстояния Δ

1. Басинюк, В.Л. Контроль малых прецизионных координатных перемещений с использованием датчиков Холла / В.Л. Басинюк [и др.] // Седьмой Белорусский космический конгресс, 24—26 октября 2017 года, Минск: матер. конгресса: в 2 т. Минск / ОИПИ НАН Беларуси; науч. ред.: д.ф.-м.н., проф. А.В. Тузиков, к.т.н. В.А. Лапицкий — 2017 (1), 92—95

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК
НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОЙ РЕЗИНЫ

П.О. Буковский

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; bukovskiy.pavel@gmail.com

В России ввиду наличия обширных регионов Крайнего Севера разработка новых эластомерных композитов триботехнического назначения, работающих в экстремальных климатических условиях, является актуальной проблемой. Основной задачей при создании таких материалов является сохранение высокоэластичности при низких отрицательных температурах и обеспечение набора эксплуатационных свойств. С этой целью морозостойкие резины модифицируются малыми концентрациями наполнителей различной природы (цеолитами, алмазами, ПТФЭ и т.д.). Одними из современных наполнителей являются углеродные нанотрубки (УНТ).

Цель — оценить влияние армирования УНТ морозостойкой резины на коэффициент трения.

Материалы и методы. В работе исследовались образцы, отличающиеся количеством УНТ введенных в состав резины на основе морозостойкого эпихлоргидринового каучука (ЭПХГ), см. табл. 1. Контртело представляло собой диск из стали с гладкой поверхностью ($Ra = 0,02$ мкм).

Таблица 1. Исследуемые образцы резины

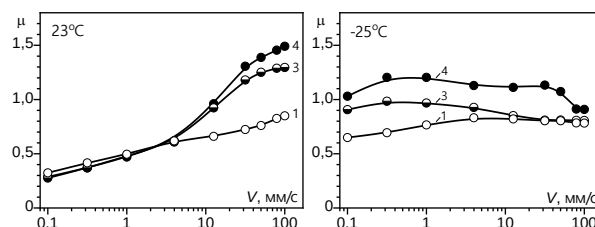
Базовый каучук	ЭПХГ			
Номер образца	1	2	3	4
Концентрация УНТ, мас. ч. на 100 мас. ч.	0	1	2	10

Экспериментальное исследование коэффициента трения μ проводилось на лабораторном трибометре по схеме контакта кольцо — диск [1]. Испытание образцов было проведено в диапазоне нормальных давлений $P = 0,1 \dots 0,4$ МПа, скоростей скольжения $V = 0,1 \dots 100$ мм/с для двух объемных температур $T = -25$ и 23 °С. Перед испытаниями образцы предварительно притирались на наждачной бумаге зернистостью 120 мкм.

Результаты и их обсуждение. Зависимости коэффициента трения от скорости скольжения для двух объемных температур при $P = 0,1$ МПа представлены на рис. 1. Результаты измерений μ для образцов резины с малой концентрацией УНТ (образцы 2) близки к образцам резины номер 3, поэтому эти данные не представлены на рис. 1. Отметим, что из полученных данных следует, что коэффициент трения слабо зависит от нормальной нагрузки, поэтому зависимости μ от V при $P = 0,4$ МПа не продемонстрированы на рис. 1.

Анализ данных показывает, что при $T = 23$ °С коэффициент трения увеличивается с ростом скорости скольжения, при этом в диапазоне $V = 10 \dots 100$ мм/с наблюдается увеличение коэффи-

циента трения с повышением концентрации УНТ в образцах. Полученные результаты объясняются адгезионным механизмом трения, который сохраняется в процессе трения до тех пор, пока износ на поверхности резины пренебрежимо мал. Из работы [2] следует, что поверхность ЭПХГ резины, наполненной УНТ, после серий тестов на трение и износ в аналогичных условиях испытаний, имеет менее поврежденную и более гладкую поверхность, чем образцы резины без УНТ. Более того, проведенные авторами исследования по оценке адгезионных свойств поверхности ЭПХГ резины указывают на увеличение адгезии при добавлении УНТ в образцы.

Рис. 1. Зависимости μ от V и T при $P = 0,1$ МПа

Анализ рис. 1 показывает, что при объемной температуре резины $T = -25$ °С с увеличением концентрации УНТ в образцах наблюдается повышение коэффициента трения во всем исследуемом диапазоне скоростей скольжения. Причем коэффициент трения плавно повышается до своего максимума, после которого происходит плавное понижение коэффициента трения. Данное поведение, характерное для резин, впервые описал К. Грош (1963), который показал, что для вязкоупругих материалов коэффициент трения с увеличением скорости скольжения изменяется по кривой с максимумом, при этом пик значений коэффициента трения будет смещаться в зависимости от объемной температуры эластомера.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-08-00615).

Автор выражает благодарность проф. Н.Н. Петровой и ст. преподавателю Е.Н. Тимофеевой за изготовление образцов.

1. Морозов А.В., Петрова Н.Н. Методика оценки коэффициента трения уплотнительных морозостойких резин // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 2. 162—167.
2. Shcherbakova O.O., Muravyeva T.I., Gainutdinov R.V., Skalei I.V., Petrova N.N., Timofeeva E.N., Zagorskiy D.L. Complex microscopy investigation of special purpose elastomers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №443. P. 012030.

ПРИМЕНЕНИЕ БАЗОВЫХ ТИПОВ ПРИСАДОК К СМАЗОЧНОМУ МАТЕРИАЛУ НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА

Ф.А. Григорьев^{1,2}

¹Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
tedoz95@gmail.com

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

Введение. Современные тенденции развития промышленности и транспорта предусматривают уменьшение экологической нагрузки на природу и урбанистическое пространство обитания человека. В области трибологии эти тенденции связаны с поиском базового смазочного материала из биodeградируемого растительного сырья и использования малых концентраций функциональных присадок к ним.

Цель исследований. Оценка возможности применения традиционных функциональных присадок к базовому смазочному материалу на основе рапсового масла.

Материалы и методика эксперимента. Изучались образцы исходных и легированных традиционными присадками растительные масла (табл. 1). Для сравнения использовалось минеральное масло И-20А (ГОСТ 20799-88), а также образцы стандартных трансмиссионных масел.

Окислительную активность масел оценивали по ГОСТ 31758–2012. Триботехнические характеристики масел определяли по ГОСТ 9490–75 на четырёхшариковой машине ЧШМ-К1 (Технопромкомплект, Украина).

Результаты исследований. Данные триботехнических испытаний всех масел представлены в табл. 2.

Установлено, что механизмы граничного трения растительных масел обусловлены процессами полимеризации триглицеридов в зоне фрикционного контакта. Образующиеся на поверхностях при воздействии давления и высоких температур смолистые продукты предохраняют истираемые материалы от износа, повышая их сопротивление задиру. Улучшение характеристик растительных масел пропорционально концентрации в них триглицеридов с ненасыщенными связями, играющих ведущую роль в процессах трибополимеризации и окисления. Однако эти процессы приводят к быстрой срабатываемости масел и увеличение их ресурса требует снижения интенсивности окислительных процессов путем введения соответствующих присадок.

В качестве ингибитора окисления был использован дифениламин (ДФА). В качестве противозадирной присадки использовалось льняное масло. В качестве комплексной присадки вводился дитиофосфат цинка (ДФ-11к), который увеличивает окислительную стабильность рапсового масла в 15 раз и существенно, до двух раз улучшает показатели триботехнических свойств (табл. 2).

Выводы. Увеличение окислительной стабильности растительных масел при одновременном сохране-

нии их триботехнических свойств является непростой задачей, поскольку их противоизносные и противозадирные характеристики связаны с процессами трибополимеризации и окисления. Компенсация ухудшения триботехнических свойств при добавлении в них антиокислительных присадок можно осуществить добавлением триглицеридов полиненасыщенных жирных кислот.

Показано, что смазочный материал на основе рапсового масла с добавлением 1,0 мас.% антиокислительного агента ДФА и 10 мас.% льняного масла может использоваться в качестве базовой смазки, характеризуясь на 12% большей нагрузкой сваривания и в 2,3 раза меньшим показателем износа в сравнении с индустриальным минеральным маслом И-20А, выбранным в качестве аналога.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что смазочный материал на основе рапсового масла с добавлением функциональной присадки Дф-11к 1 мас.% может использоваться в средненагруженных узлах и механизмах, соответствуя триботехническим характеристикам стандартных трансмиссионных масел и имеет высокие значения окислительной стабильности.

Таблица 1. Физико-механические свойства растительных масел

Испытуемое масло	Плотность, кг/м ³	Температура вспышки, °С	Окислительная стабильность, с
Льняное	930	>280	1708
Рапсовое	918-926	280	670
Подсолнечное	916-920	245	620
Кукурузное	917,7	232	500

Таблица 2. Триботехнические свойства смазочных материалов

Масло	Параметр	
	Нагрузка сваривания	Показатель износа при 40 кгс, мм
Рапсовое	133	0,76
Льняное	168	0,73
И-20А	119	1,65
Трансмиссионное масло 1	168	0,40
Трансмиссионное масло 2	160	0,37
Рапсовое масло + 1 мас.% ДФА с добавлением льняного	3 мас.%	133
	5 мас.%	126
	10 мас.%	133
Рапсовое масло с добавлением Дф-11к	0,1 мас.%	178
	0,5 мас.%	200
	1,0 мас.%	211
	1,5 мас.%	211

ВЛИЯНИЕ ТРИБОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА МЕХАНИЗМЫ ТРЕНИЯ ПАРЫ ШХ15 ПО Ni-P ПОКРЫТИЮ

Д.М. Гуцев¹, А.Я. Григорьев¹, А.П. Ласковнев²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А Белого НАН Беларуси, Гомель; Gucevd@mail.ru

²Национальная академия наук Беларуси, Минск

Введение. Триботехнические характеристики Ni-P покрытий зависят не только от физико-механических свойств. В их составе присутствуют химически активные элементы — фосфор легко окисляется, образуя легкоплавкие оксиды, являющиеся основой фосфатных стекол, а никель, несмотря на жаростойкость, в тонкодисперсном состоянии проявляет пиррофорные свойства и сгорает с выделением большого количества тепла. Таким образом, фрикционное взаимодействие Ni-P покрытий сопровождается высокой трибохимической активностью, способной влиять на механизмы трения и износа.

Цель исследований. Установить характер влияния трибохимической активности на механизмы трения Ni-P в контакте со стальным контртелом.

Материалы и методика эксперимента. Образцами служили покрытия Ni-P толщиной 10 мкм, осажденные химическим способом на подложки из стали марки 45 (ГОСТ 1050–88). Оценка триботехнических свойств покрытий проводилась в условиях трения без смазки по схеме шар (Ø 4,7 мм, ШХ15) по плоскости при возвратно-поступательном движении с амплитудой 10 мм и скоростью 2 мм/с.

Результаты исследований. Установлено, что при нагрузке до 250 мН, коэффициент трения покрытий стабилен в течение всего цикла испытаний и не превышает значение 0,17 (Рис.1 а).

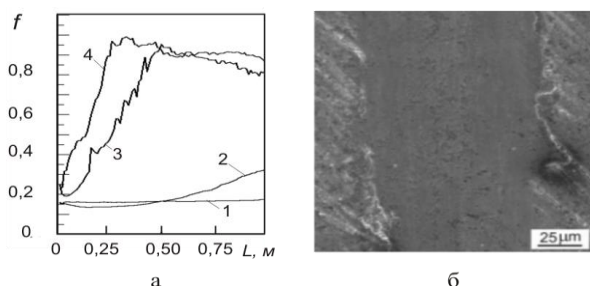


Рис. 1. Трение ШХ15 по Ni-P покрытию. а — зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки: 1 — 250, 2 — 500; 3 — 750 и 4 — 1000 мН. б — изображение поверхности трения при нагрузке 750 мН (РЭМ)

Анализ морфологии поверхностей трения показал, что при таких нагрузках основным механизмом износа является усталостное разрушение.

Трение при нагрузке 500 мН сопровождалось относительно плавным возрастанием коэффициента трения до достижения стабильных значений. Характер разрушений поверхностей трения остается прежним, при этом размер частиц износа незначительно уменьшился.

При нагрузках 750 и 1000 мН наблюдается

скачкообразное увеличение коэффициента трения до значений 0,80—0,90. Поверхность трения становится гладкой с отдельными областями адгезионного разрушения (рис. 1, б). Частицы износа очень мелкие.

Элементный анализ покрытий после испытаний при нагрузках 250 и 750 мН указывает на увеличение концентрации кислорода на дорожке трения и в продуктах износа (табл. 1) с увеличением нагрузки. Это свидетельствует о механофизическом инициировании процессов окисления материалов в зоне фрикционного контакта.

Таблица 1. Содержание кислорода в покрытии при трении, мас. %

Место измерения	Нагрузка, мН	
	250	750
Частицы износа	2,7	5,6
След трения	9,6	19,0

Оценка химического состава продуктов износа методом вторично-ионной масс-спектрометрии показала, что при нагрузке 750 и 1000 мН в диапазонах масс 110—120 и 125—140 [а/е] в их составе появляются фрагменты, характерные для линейных фосфатов вида $\text{Ni}_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$, кольцевых металлофосфатов ($\text{Me}_n\text{PnO}_{3n}$) и фосфатных стекол ($\text{P}_2\text{O}_5\text{--NiO}$). Появление этих веществ в зоне фрикционного контакта сопровождается резким увеличением коэффициента трения пары.

Выводы. Экспериментальные данные свидетельствуют о протекании трибохимических процессов в зоне фрикционного контакта системы Ni-P покрытие и сталь ШХ15, оказывающих существенное влияние на механизмы трения и износа. Качественно картина происходящих при этом процессов может быть представлена следующим образом.

При росте нагрузки увеличивается износ поверхностей. Образующиеся пиррофорные частицы никеля измельчаются и при достижении критических размеров окисляются с выделением значительного количества тепла, что в свою очередь, приводит к протеканию целого ряда реакций с участием фосфора, никеля и кислорода воздуха. При этом образуется сложный по составу слой поверхности трения, свойства которого, очевидно и играют главную роль в ухудшении триботехнических характеристик исследованной пары трения.

Результаты работы могут быть использованы для оптимизации состава композитных Ni-P покрытий, используемых в узлах трения.

МИКРОТВЕРДОСТЬ И ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ AlMg6/C60+AlN

А.И. Елкин, В.В. Рябкова, А.Е. Паникин, А.В. Аборкин

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия; aborkin@vlsu.ru

В настоящее время, как в РФ, так и за рубежом проводятся интенсивные исследования, направленные на разработку технологий газодинамического напыления, изучение структурно-фазового состава и функциональных свойств покрытий. Анализ современного состояния исследований показывает, что работы, посвященные получению и изучению гибридных покрытий, упрочненных одновременно нано- и микроразмерными частицами, имеют единичный характер. В тоже время, учитывая опыт создания объемных гибридных композитов на основе алюминия и его сплавов, перспективным представляется и создание гибридных покрытий, полученных методом газодинамического напыления. Для формирования гибридных покрытий, содержащих кроме микроразмерных частиц наноразмерные, необходимо использование порошка в виде механической смеси, состоящей из агломератов сложного состава и керамических частиц. В данном случае агломераты должны представлять собой частицы матричного материала с распределенным в их объеме наноразмерным наполнителем, а также внедренные в агломераты и расположенные на поверхности микроразмерные керамические частицы [1-3].

Цель данной работы состоит в изучении механических и фрикционных свойств порошковых покрытий AlMg6/C60+AlN , полученных газодинамическим напылением.

Порошок для холодного газодинамического напыления был получен методом механического синтеза в шаровой планетарной мельнице за два технологических передела. На первом переделе был получен наноконпозиционный порошок AlMg6/C60 . На втором переделе к полученному наноконпозиционному порошку добавляли 25—50 вес.% AlN и продолжали обработку. В результате были получены порошки, представляющие собой механическую смесь, состоящую из агломератов и керамических частиц. Полученные порошки напыляли на подложки из листа Ст08кп. Для напыления использовали установку холодного газодинамического напыления ДИМЕТ-404. Напыление осуществляли в два прохода при температуре потока воздуха 270 °С, расстоянии от среза сопла до поверхности подложки 10 мм, скорости перемещения сопла относительно поверхности 10 мм/с, коэффициенте перекрытия ~63%. Изучение микроструктуры покрытий проводили на поперечных шлифах с помощью инвертированного микроскопа RAZTEK MRX9-D. Микротвердость покрытий измеряли на поперечных шлифах методом Виккерса с помощью микротвердомера Shimadzu

НМВ-2 при нагрузке 245 мН и выдержке 10 с. Коэффициент трения скольжения f определялся на воздухе в условиях контактного взаимодействия образцов с покрытиями и шарика из стали ШХ15 с помощью трибометра CSM INSTRUMENTS. Испытания проводили при нагрузке 10 Н с постоянной скоростью скольжения 0,05 м/с. Путь трения во всех опытах составил 100 м. Сравнительный анализ данных измерения микротвердости показывает, что введение в порошковую смесь 25—50 вес.% AlN ведет к повышению твердости покрытий с 278 до 306 НВ. Покрытия имеют достаточно однородную микроструктуру, представляющую собой плотно упакованные деформированные частицы матричного материала чешуйчатой формы с равномерно распределенными керамическими частицами в объеме покрытий. Отмечено разрушение керамических частиц при напылении. Результаты измерения коэффициента трения показывают, что он изменяется незначительно в диапазоне от 0,37 до 0,39. Анализ СЭМ-изображений дорожек износа, позволил выявить особенности, характеризующие механизм износа гибридных покрытий в условиях сухого трения при контактом взаимодействии с термообработанной сталью. К данным особенностям следует отнести формирование борозд сдвигов с периодически чередующимися микроскопическими гребнями. Появление переходных слоев, содержащих микроразмерную и наноразмерную механическую смесь. Возникновение трещин в направлении, перпендикулярном скольжению и с последующей деламинацией контактной поверхности гибридного покрытия. Перечисленные особенности свидетельствуют о том, что контактное взаимодействие осуществляется с образованием третьего тела, которое способствует снижению коэффициента трения и повышению износостойкости.

1. Аборкин А.В., Алымов М.И., Архипов В.Е., Хренов Д.С. Формирование гетерогенных порошковых покрытий с двухуровневой микро- и наноконпозиционной структурой в условиях газодинамического напыления // Доклады академии наук. 2018. Т. 478. № 6. С. 637—641.
2. Aborkin A.V., Sobol'kov A.V., Elkin A.I., Arkhipov V.E. Structural phase composition and effectiveness of gas-dynamic spraying of hybrid coatings based on AlMg2 nanocrystalline matrix reinforced with graphene-like structures and micro-size corundum // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 951. 012010.
3. Аборкин А.В., Алымов М.И., Киреев А.В., Соболев А.В., Архипов В.Е. Структура и эффективность газодинамического напыления гибридных покрытий на основе нанокристаллической алюминиевой матрицы // Металлург. 2018. № 8. С. 73—77.

НОВЫЙ ПОДХОД К ПОЛУЧЕНИЮ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

В.И. Жорник¹, А.В. Запольский², А.В. Ивахник^{1,2}, В.П. Ивахник¹, Л.Ю. Тычинская³

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; zhornik@inmash.bas-net.by

²ООО «Евразия Лубрикантс», Заславль, Беларусь

³Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Создание биоразлагаемых смазочных материалов является одним из важных направлений «зеленой» экономики. Предлагаемая технология производства биоразлагаемых смазочных материалов наиболее близка к технологии производства комплексных сульфонат кальциевых смазок и базируется на химическом подходе к получению нанокomпозиционных смазочных материалов, при котором наноразмерные компоненты не вводятся в состав смазки извне в готовом виде, а синтезируются непосредственно в процессе получения смазки из компонентов реакционной массы. В частности, при получении сульфонат кальциевых смазок используется высокомолекулярная монобензолсульфоновая кислота, которая нейтрализуется гидроксидом кальция с получением монобензолсульфоната кальция, по своему строению соответствующего всем признакам амфифильных полимеров. Параллельно идет синтез наночастиц карбоната кальция, сохранение которых обеспечивается оболочкой из амфифильных полимеров. Для придания необходимых реологических параметров получаемый материал дополняется еще одним компонентом дисперсной фазы из комплекса в виде 12-оксистеарата и тетрабората кальция.

В нашем случае также используются амфифильные полимеры, но они получают из осерненых ацилглицеридов после нейтрализации гидроксидом кальция. Соединения сульфоацилглицерида кальция обладают необходимыми для создания мицеллярной структуры амфифильными свойствами. Полученные амфифильные соединения можно рассматривать как индивидуальную присадку и как оболочку для мелкодисперсных частиц вне зависимости от природы их получения (синтез в реакторе или добавка в реакционную смесь готовых частиц). Мицеллы из наночастиц кальцита в оболочках из амфифильных молекул обладают загущающим эффектом и являются дисперсной фазой пластичных смазок. Таким образом, главный компонент дисперсной мицеллярной фазы пластичных смазок — амфифильные полимеры в виде сульфоацилглицеридов кальция и дисперсионная среда пластичных смазок имеют одну и ту же природу — растительное масло.

Для отработки технологии получения биоразлагаемых пластичных смазок проведены исследования по определению химического состава производимых в РБ рапсовых масел и изучению процесса получения полисульфокислот из них. Содержание жирных кислот в составе триацилглицеридов, определенное с ис-

пользованием методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ), хорошо согласуется между собой. Качественный состав исследованных образцов одинаков, количественный — различается незначительно. Наиболее представлены моно- и полиненасыщенные кислоты, их общее количество в исследованных образцах масла превышает 92%, при этом на долю олеиновой кислоты приходится 51,6—53,2%. Далее по убыванию следуют линолевая (18,6—19,0%), α-линоленовая (8,9—10,6%), эйкозеновая (гондоиновая) (5,7—6,1%), эруковая (3,2—3,9%), вакценовая (2,3—2,5%) и в незначительных количествах γ-линоленовая, эйкозодиеновая и др. кислоты. Идентифицированные насыщенные кислоты представлены, главным образом, пальмитиновой и стеариновой кислотами, их общее содержание — менее 7%.

Выполненный с помощью метода ЯМР анализ продуктов сульфатирования рапсового масла показал, что:

- при взаимодействии серной кислоты с рапсовым маслом, в первую очередь, протекают реакции по двойным связям ненасыщенных жирных кислот с образованием соответствующих сульфозэфиров с разным положением сульфозэфирной группы в молекулах;
- наблюдается миграция двойных связей в молекулах, что способствует образованию большого количества новых соединений;
- реакция сопровождается образованием 1,3- и 1,2-диацилглицеридов, на поздних стадиях спектрально фиксируются и моноацилглицериды жирных кислот, с течением времени количество этих продуктов увеличивается; одновременно в смеси определяются молекулы свободных жирных кислот и глицерина;
- при больших концентрациях серной кислоты триацилглицериды разрушаются полностью;
- уменьшение содержания ненасыщенных жирных кислот в составе глицеридов с течением времени и при невысоких концентрациях добавленной серной кислоты обусловлено реакциями окисления и полимеризации.

Получение амфифильных соединений из растительных масел для стабилизации наночастиц и создания фазообразующих мицеллярных структур открывает широкие возможности в развитии трибоматериаловедения и получения новых смазочных материалов с высокими эксплуатационными свойствами.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

А.С. Кобец², О.С. Кабат^{1,2}, А.Д. Деркач², С.В. Зотов³, К.В. Овчинников³

¹Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, Украина;

²Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, Днепр, Украина

³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; zotov-1969@mail.ru

Актуальность работы. В современном машиностроении применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) триботехнического назначения получило широкое распространение. Благодаря ПКМ удалось создать узлы машин и механизмов, которые работают при относительно высоких нагрузках, скоростях скольжения и температурах в агрессивных и абразивных средах без смазывания и при граничной смазке. К недостаткам большинства ПКМ относятся их невысокая прочность, тепло- и термостойкость. Актуальной задачей является разработка новых ПКМ триботехнического назначения с улучшенными свойствами.

Материалы исследований. В качестве полимерных матриц использовали: ароматический полиамид (марка фенилон С1); фторполимер (марка фторопласт-4). В качестве наполнителя использовали аморфный диоксид кремния — силикагель, который получали путем осаждения из водного-щелочного раствора метасиликата натрия.

Методы исследований. Триботехнические свойства полимерных матриц и ПКМ на их основе определяли на машине «2070 СМТ-1» при фрикционном взаимодействии со сталью в режиме трения без смазывания. Морфологию поверхностей трения изучали при помощи электронного микроскопа Superprobe-733 (Jeol). Физико-механические и теплофизические свойства ПКМ исследовали в соответствии с ISO 604, ISO-2039-1, ISO-11358, ISO 1183-1.

Результаты и их обсуждение Исходя из результатов предыдущих исследований, количество диоксида кремния в полимерной матрице составляло от 5 до 30 мас.%. В ходе триботехнических испытаний установлено, что концентрационные зависимости коэффициента трения, интенсивности линейного изнашивания и температуры на поверхности трения имеют экстремальный характер с минимумом в области концентраций наполнителя 10 мас.%. Это, по всей видимости, объясняется влиянием диоксида кремния на характер трения пары «ПКМ-сталь». Установлено, что минимальные значения шероховатости стальной поверхности наблюдаются у образцов после трения с композитом с содержанием наполнителя 10 мас.%. Это коррелирует с ре-

зультатами исследований триботехнических характеристик пары трения «ПКМ-сталь». Представляет интерес изучить морфологию стальной поверхности до и после фрикционного взаимодействия с ПКМ с целью установления причины уменьшения коэффициента трения и интенсивности линейного изнашивания при трении разработанных ПКМ в сравнении с исходными полимерами. Микрофотографии поверхностей трения стального образца после фрикционного взаимодействия с исходными полимерами и ПКМ на их основе имеют значительные отличия. На стальной поверхности после трения с ПКМ наблюдаются «островки переноса», которые, по всей видимости, являются соединениями на основе диоксида кремния, которые образовались на стальной поверхности в результате трибохимических реакций при фрикционном взаимодействии. Это обстоятельство влияет на характер трения, способствуя уменьшению коэффициента трения и износа ПКМ при трении по стали. Для ПКМ с оптимальным содержанием наполнителя (10 мас.%) провели физико-механические и теплофизические исследования (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические и теплофизические свойства разработанных ПКМ

Показатель свойств	Матричный полимер	
	фенилон С1	фторопласт-4
Плотность, г/см ³	1,34	1,94
Напряжение предела текучести при сжатии, МПа	243	14
Твердость, МПа	231	46
Температура размягчения по Вика, °С	274	184
Термостойкость, °С	360	400

Выводы. Получены ПКМ триботехнического назначения с высоким уровнем физико-механических и теплофизических свойств, которые можно рекомендовать к использованию в узлах трения машин и механизмов, работающих при высоком уровне нагрузок и температур.

Существует актуальность продолжения исследований усложненных составов подобных ПКМ с модифицированными компонентами.

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА ВО ФРИКЦИОННОМ ДИСКЕ СО СПЕЧЕННЫМ ФРИКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

А.Ф. Ильющенко¹, А.В. Лешок¹, Г.Ф. Громыко², Н.П. Мацука²

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

²Институт математики НАН Беларуси, Минск, Беларусь. grom@im.bas-net.by

Проблема разработки новых составов спеченных порошковых фрикционных материалов для узлов трения имеет очень важное значение для повышения надежности и долговечности узлов трения автотракторной техники и техники специального назначения. Отличительной особенностью разработки таких материалов является длительность процесса как стендовых, так и натурных испытаний. Создание модели тепловой нагруженности фрикционного диска во время испытаний с учетом теплофизических свойств, зависящих от температуры и от контактирующих материалов, позволит прогнозировать его работоспособность в реальных условиях.

Цель. Разработка математической модели распределения тепла во фрикционном диске со спеченным порошковым фрикционным материалом для работы в условиях граничного трения.

Результаты и их обсуждение. Разработана математическая модель для расчета тепловых процессов в диске и вращающемся в начальный момент времени с угловой скоростью контртеле во время их контакта (аналог буксования). Для исследования тепловых процессов материал фрикционной накладки описывается сплошной изотропной средой с теплофизическими параметрами, зависящими от процентного состава компонентов и температуры. С учетом наличия канавок контакт фрикционного диска с контртелом представлен в виде дискретных зон: касающихся границ поверхности фрикционной накладки и контртела и границ контртеле-масло (в канавках). Вопросы гидродинамики масла при работе диска (такие как скорость слива масла, его подача на диск) учитываются в модели температурой масла, которая влияет на процессы

охлаждения при контакте этих зон, а также заданным коэффициентом трения, зависящим от времени в процессе торможения.

Моделирование тепловых процессов в системе контртеле-фрикционный диск (фрикционная накладка — несущий диск — закрепленная чаша) проведена на основе теплового баланса с учетом границы контакта фрикционного диска с поверхностью контртела. В пятнах соприкосновения рассмотрено условие идеального контакта в виде условий сопряжения различных материалов с учетом тепловыделения на поверхности трения. На внешних границах области расчета заданы условия теплообмена с окружающей средой.

Модель предназначена для виртуального исследования тепловой нагруженности фрикционных дисков с различным композиционным составом фрикционной накладки во время торможения при стендовых и натурных испытаниях в зависимости от заданной мощности трения, от площади трения (регулируется размером площади выступов между канавками), от состава и толщины фрикционной накладки и др.

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 №38. Минск, Белорусская наука, 2015.
2. Карташевич, А.Н. Материалы и конструктивные параметры фрикционных элементов механической трансмиссии тракторов / А. Н. Карташевич, А.Ф. Скадорва, А.В. Лешок, А.А. Дмитриевич. Вестник Белорусской Государственной сельскохозяйственной академии. — 2013. — №4. — С. 234.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ Al-Cr-N НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА

А. Гилевич¹, Е. Добруховска¹, Д. Муржинский¹, Т.А. Кузнецова², Б. Вархолински¹

¹Кошалинский технологический университет, Кошалин, Польша

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; kuzn06@mail.ru

Введение. Покрытия из CrN широко используются в металлообработке благодаря хорошим трибологическим свойствам и коррозионной стойкости [1], но их твердость и стойкость к окислению не всегда достаточны для удовлетворения требований современной механической обработки. Добавление металлических или неметаллических элементов (Ti, Si, Al, C, B, O) к CrN позволяет улучшить характеристики покрытий [2]. Одной из наиболее перспективных тройных систем является Al-Cr-N благодаря своей превосходной стойкости к окислению и высоким механическим свойствам [2]. Al-Cr-N обладает лучшей износостойкостью благодаря образованию оксидных слоев на изношенных поверхностях в процессе работы. Свойства Al-Cr-N покрытия зависят от концентрации в нем алюминия.

Целью данной работы являлось определение влияния химического состава покрытий Al-Cr-N, полученных катодно-дуговым испарением на стальных подложках HS6-5-2, на структурные, механические и коррозионные свойства покрытий.

Материалы и методы. Покрытия Al-Cr-N наносили катодно-дуговым испарением на стальные подложки HS6-5-2 (аналог Р6М5) с использованием установки TINA-900 М. Применяли катоды из сплава AlCr (70:30). Подложки полировали до параметра шероховатости $R_a = 0.02$ мкм. Камеру вакуумировали до базового давления 1 мПа, подложки нагревали до температуры около 350 °С. Процессу нанесения покрытия предшествовало травление поверхности подложек ионами аргона и хрома при $U = 600$ В, $P_{Ar} = 0.5$ Па в течение 10 минут при токе хромовой дуги 80 А. Тонкий слой хрома толщиной около 100 нм улучшал адгезию покрытия к подложке. Покрытия Al-Cr-N наносили при напряжении смещения подложки — 50 В, токе дуги 80 А, давлении азота 2 Па. Толщина покрытий составляла около 3 мкм.

Фазовый состав покрытий определяли рентгенофазовым анализом (РФА) на дифрактометре модели X'Pert PANalytical с использованием излучения $Cu-K_{\alpha}$ при напряжении 40 кВ, токе 35 мА, скорости сканирования — 20 с/шаг, шаге 0.05 в диапазоне углов дифракции от 20 до 90°. Химический состав покрытий определяли с помощью рентгеновского микроанализа WDS (дисперсионная спектроскопия длин волн). Содержание азота измеряли при ускоряющем напряжении 10 кВ и токе пучка 20 нА с

точностью ок. 0,5 ат.%. Микроструктуру оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM-5500LV). Энергетическая дисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS) была применена для анализа химического состава следов износа в покрытиях. Использовались системы Oxford Link ISIS 300 и Noran Instruments IBEX соответственно. Толщина покрытия была определена методом шарового истирания. Шероховатость поверхности исследуемых покрытий оценивали с помощью контактного профилометра Hommel Werke T 8000. Измерения твердости проводились с использованием микротестера FISHERSCOPE® HM2000. Значение твердости определяли как среднее от 20 измерений. Для оценки адгезии покрытий был применен Revetest (CSEM, Швейцария), оснащенный алмазным индентором Rockwell типа C с радиусом 0,2 мм. Параметры испытания были следующими: скорость скольжения индентора — 10 мм / мин, увеличение нормальной силы — от 0 до 100 Н. Критическая нагрузка определялась как нагрузка, при которой наблюдалось полное отслоение покрытия от подложки.

Результаты исследования. Изучено влияние химического состава покрытий на структурные, механические и химические свойства. Были исследованы структура покрытий, скорость осаждения, химический состав, твердость, адгезия, износ и коррозия. Обнаружено, что добавление алюминия к покрытию CrN значительно увеличивает количество поверхностных дефектов и шероховатость поверхности. Добавление алюминия изменяет параметр решетки и уменьшает размер кристаллитов. Покрытия характеризуются высокой адгезией, и высокой критической нагрузкой в испытаниях царапанием, уменьшающейся с 130 Н для CrN до 96 Н для $Al_{0.80}Cr_{0.20}N$. Все покрытия являются износостойкими с самым низким удельным объемным износом $(2,1 \pm 0,6) \times 10^{-17}$ м³ / Нм для $Al_{0.70}Cr_{0.30}N$.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф18Р-239 и №Т18ПЛШГ-002.

1. B. Warcholinski, A. Gilewicz, at el. An analysis of macroparticle-related defects in the CrCN and CrN coatings in dependence on the substrate bias voltage, Vacuum 86 (2012) 1235-1239.
2. Warcholinski, B., Gilewicz, at el. Structure of CrON coatings formed in vacuum arc plasma fluxes Surface and Coatings Technology 2017 V309 P920—930

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ SiC

В.А. Лапицкая, Т.А. Кузнецова, С.А. Чижик, П.С. Гринчук, Д.А. Соловей

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

Введение. Тонкие керамические карбидокремниевые покрытия (SiC) благодаря их высоким износостойкости, теплопроводности и теплозащитным свойствам, жаропрочности, высокой удельной прочности и жесткости, радиационной прочности и др., нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Механические свойства (твердость, коэффициент трения, величина внутренних напряжений и др.) существенно зависят от условий осаждения, толщины покрытия и материала подложки [2]. Важным механическим параметром, требующим обязательного контроля в покрытиях, является сопротивление хрупкому разрушению (трещиностойкость), количественно характеризующийся критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} [3, 4]. Существуют различные методы определения K_{Ic} , но не все можно применить к тонким покрытиям. Вид и процесс распространения трещин в тонком керамическом покрытии отличается от трещин в объемной керамике.

Распространенным методом определения трещиностойкости покрытия является метод индентирования с последующим измерением параметров отпечатков и длины радиальных трещин у отпечатков. Традиционно для количественного определения длины трещин используется оптическая микроскопия, а в редких случаях — сканирующая электронная микроскопия. Как было установлено в [3], при малых нагрузках погрешность определения длины трещин и параметров отпечатка оптическим методом по сравнению с атомно-силовой микроскопией, достигает 30%.

Целью данной работы являлось определение трещиностойкости пленки SiC методом индентирования с визуализацией отпечатков при помощи атомно-силовой микроскопии.

Материалы и методы. Пленку SiC толщиной 610 нм наносили методом магнетронного распыления на стеклянную подложку.

Отпечатки выполняли с помощью микротвердомера ПМТ-3 (Россия). Нагрузка на индентор составляла от 0,5 до 500 грамм (от 0,0049 до 4,903 Н соответственно). Морфологию поверхности отпечатков исследовали на атомно-силовом микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа NSC-11 (производство MicroMash, Эстония) с радиусом кривизны острия зонда 5,5 нм и жесткостью консоли 7,1 Н/м.

Результаты исследования. Методом атомно-силовой микроскопии исследована морфология отпечатков на покрытии SiC после нагрузок в диапа-

зоне от 0,0049 до 4,903 Н (рис. 1). Количественно определены коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} и повреждаемость покрытия K_{Ic}/H_v . Установлено, что радиальные трещины появляются вокруг отпечатка при нагрузке 0,0196 Н, а трещины из углов отпечатка появляются при нагрузке 1,961 Н. Также при нагрузках от 0,981 Н наблюдается появление трещин и на подложке.

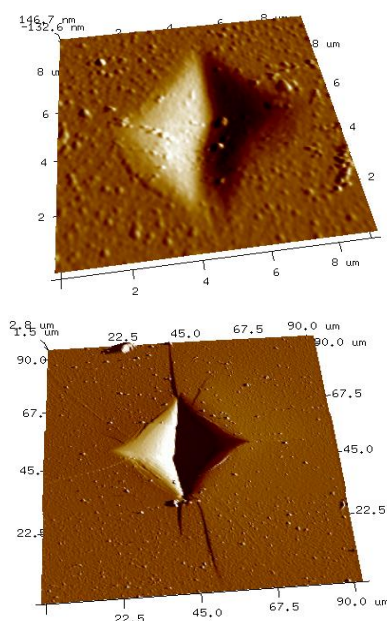


Рис. 1. АСМ-изображения отпечатков на поверхности пленки SiC: а — при нагрузке 0,0049 Н, поле сканирования 9х9 мкм²; б — при нагрузке 4,903 Н, поле сканирования 90х90 мкм²

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф18Р-239).

1. Филонов К. Н., Курлов В. Н. и др. Особенности свойств наноструктурированных карбидокремниевых пленок и покрытий, полученных новым способом // Известия РАН. Серия физическая. — 2009, (73), № 10, 1457—1459
2. Усеинов А., Кравчук К., Маслеников И. Индентирование. Измерение твердости и трещиностойкости покрытий // Наноиндустрия. — 2013, (45), № 7, 45—56
3. Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А., Гринчук П.С. Определение трещиностойкости с использованием АСМ Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. XIII Междунар. конф., Минск, 16—19 окт. 2018 г. — Минск: Беларуская навука. — 2018, 260—266.
4. Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А., Комаров А.И., Фролов Ю.И. Определение трещиностойкости МДО покрытий с визуализацией отпечатка АСМ / Труды XXIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», 11—14 марта 2019 г. — г. Нижний Новгород: ИФМ РАН, Россия. — 2019, том 1, 364-365.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЛЕНОК ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА С НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

В.А. Лапицкая¹, Г.Б. Мельникова¹, Т.А. Кузнецова¹,
А.Д. Замковец², С.А. Чижик¹, Д.А. Котов³

¹ Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь; vasilinka.92@mail.ru

² Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси Минск, Республика Беларусь

³ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Введение. На структуру и свойства сформированных на поверхности пленок большое влияние оказывают исходные характеристики субстрата (шероховатость, химический состав и структура). Поэтому перед модификацией поверхности проводят ее предварительную обработку с целью очистки и структурирования. Для этого используют обработку в ультразвуковой ванне, кипячение растворах различного химического состава, ионно-лучевую обработку. Для тонких полимерных пленок хорошо себя зарекомендовала обработка низкотемпературной плазмой диэлектрического барьерного разряда в токе инертного газа (ПДБР), которая позволяет модифицировать поверхность, изменяя ее структурно-функциональные свойства.

Цель работы — изучить влияние предварительной обработки поверхности субстрата ПДБР на структуру и свойства тонких полимерных композиционных пленок, допированных наночастицами.

Материалы и методы исследования. Пленки полиметилметакрилата (ПММА) и ПММА с наночастицами диоксида кремния ($d = 10\text{—}20\text{ nm}$, Sigma-Aldrich) формировали методом спин-коутинга (центрифугирования) на предметных стеклах, предварительно обработанных ПДБР (мощность источника $10\text{—}30\text{ Вт}$, расстояние от источника до образца — 20 мм) в течение 1 мин . Скорость вращения подложки составляла 8000 rpm в течение 2 мин . Пленки ПММА ($M_w = 15\,000$, Sigma-Aldrich) выделяли из раствора в хлороформе с концентрацией 1 мг/мл . Композиционные пленки ПММА с наночастицами формировали из смеси суспензий ($c = 1\text{ мг/мл}$) ПММА и диоксида кремния в хлороформе в количественном соотношении $1 : 250$ моль, соответственно.

Исследования структуры проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа MPP-21100 (Bruker, США) с радиусом закругления острия 17 нм , с жесткостью консоли $2,63\text{ Н/м}$. Значения модуля упругости и силы адгезии рассчитывали по модели Джонсона – Кенделла – Робертса.

Спектры пропускания записывались на спектрофотометре Cary 500 (Varian Inc., США), спектры зеркального отражения — на спектрофотометре MC122 (SOLinstruments, Республика Беларусь). Угол падения при записи спектров отражения со-

ставлял 10° в диапазоне длин волн от 190 до 1200 нм .

Результаты и их обсуждение. Обработка поверхностей предметных стекол ПДБР позволила сформировать однородные по толщине пленки (рис. 1), значения локального модуля упругости составляют $114,0\text{ МПа}$ и силы адгезии $13,0\text{ нН}$.

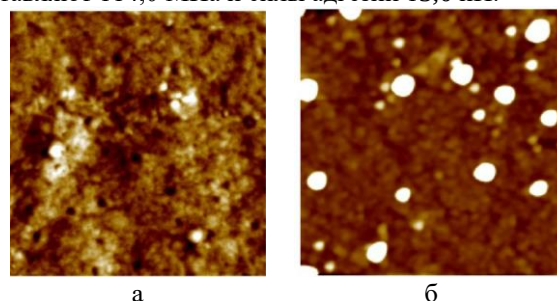


Рис. 1. АСМ-изображения ($1 \times 1\text{ }\mu\text{м}$) структуры пленок ПММА (а) и ПММА с наночастицами оксида кремния (б)

Наночастицы диоксида кремния равномерно распределены по поверхности в композиционных пленках. Диаметр частиц составляет 40 нм , что значительно меньше по сравнению с образующимися на поверхностях без обработки плазмой (100 нм и более). Введение наночастиц диоксида кремния позволяет повысить гидрофобные свойства поверхности, уменьшая значения силы адгезии до $8,1\text{ нН}$, однако модуль упругости пленки уменьшается до значений $64,1\text{ МПа}$. Нанесение наночастиц диоксида кремния на поверхность ПММА не позволило сформировать однородный структурированный слой наночастиц на поверхности полимера, значения модуля упругости увеличиваются незначительно, а гидрофильные свойства возрастают в 2 раза.

Светопропускание и светотражение модифицированных стекол не изменилось по сравнению с исходными образцами.

Заключение. На основании проведенных исследований показана возможность использования низкотемпературной плазмы ДБР для формирования однородных наноструктурированных поверхностей, которые могут быть применены в оптических устройствах и сенсорах различного назначения.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии», зад. 2.82.

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ
НАПЛАВОК ИЗ КРЕМНИСТОЙ БРОНЗЫ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ РЕЗЦАМИ

В.Я. Лебедев

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь; fti_lebedev@mail.ru

При эксплуатации шнеков, экструдеров и других элементов техники их рабочие поверхности подвергаются воздействию высоких температур и давлений, а также абразивному изнашиванию. В пищевой промышленности эти детали изготавливаются, как правило, из коррозионностойких сталей марок 12Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 17Х18Н9. Для предотвращения абразивного изнашивания и схватывания контактирующих поверхностей деталей выполняется покрытие гребней шнеков антифрикционными материалами. Чаще для этого применяются сплавы на основе меди типа БрОЦ10-2, БрОФ6,5-0,4, а также кремний-марганцовистые жаропрочные бронзы, пригодные для сварки БрКМц3-1, БрКН1-3 и др. Зарубежные фирмы используют для подобных работ также бронзу $\text{CuSi}_3\text{Mn1}$ и другие наплавки на медной основе. Существенное преимущество таких материалов состоит в хорошей обрабатываемости резанием и достаточной текучести присадочного материала при сохранении высоких значений физико-механических свойств наплавки.

В работе изучены контактные явления в зоне резания и особенности стружкообразования при точении наплавки из кремнистой бронзы CuSi_3 твердосплавными резцами марок ВК6 и Т15К6. Установлено влияние режимов резания на параметры качества обработанных поверхностей.

Выполнен анализ структуры по сечению образцов из 12Х18Н10Т, наплавленных при различных режимах проволокой из кремнистой бронзы CuSi_3 производства компании «Lastek». Условия наплавки: аргодуговой метод при силе тока 60–100 А, полуавтоматическая сварка в среде защитного газа при силе тока 70–180 А.

Наличие переходных слоев не учитывалось при исследовании, так как точение велось на глубине наплавки с однородной структурой и граница раздела «наплавка — прослойка-основа» не вскрывалась. При исследовании механофизики процесса резания устанавливалось влияние материала резца и технологических режимов на параметры стружкообразования и особенности контактных процессов. Режимы резания варьировались в пределах: скорость резания $v = 1,2\text{—}5$ м/с, глубина $t = 0,1\text{—}2$ мм, подача $S = 0,1\text{—}0,5$ мм/об. Исследование морфологии рабочих поверхностей инструмента в исходном и изношенном состоянии выполнялось с использованием металлографического комплекса на базе микроскопа «Микро 200». Микроанализ поверхностей износа инструмента, исследование структуры и морфология поверхностей стружки проводился на электронном микроскопе VEGA TESCAN. Микротвердость наплавки и стружки измерялась на приборе «Duramin-5».

На рис. 1 показаны виды и форма стружек при точении наплавки на различных режимах.



Рис. 1. Форма стружки при точении наплавки резцом Т15К6 (а) — $v = 2,6$ м/с, $t = 1$ мм, $S =$ (справа налево 0,12, 0,25, 0,6 мм/об), (б) — вид стружки с боковой стороны

Стружка со стороны обрабатываемой поверхности имеет суставчатый вид на всех режимах обработки (рис. 2, а, б). Шаг складок материала при образовании суставчатой стружки составляет 3–5 мкм. Края стружки со стороны выхода лезвия резца на обрабатываемую поверхность имеют пилообразный вид с надрывами. Морфология поверхности по краям стружки указывает на значительное деформационное воздействие при отрыве стружки от поверхности резания (рис. 2, б).

Морфология прирезцовой стороны стружки (рис. 2, в) характеризуется наличием полос скольжения со сдвигом и треков абразивного происхождения, вызванных контактными явлениями на кромке и передней поверхности режущего лезвия. Перемещение разогретого слоя материала наплавки (со следами цветов побежалости) вдоль передней поверхности лезвия вызваны высокой температурой непосредственно в зоне резания и пятнах контакта на передней и задней поверхностях лезвия.

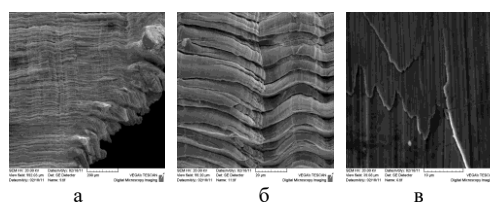


Рис. 2. Морфология стружки со стороны обрабатываемой поверхности (а, б) и прирезцовой (в)

Показано, что при точении наплавки из кремнистой бронзы CuSi_3 характер стружкообразования и качество обработанных поверхностей определяется контактными процессами в зоне резания и на поверхностях лезвия и зависят от режимов резания. Точением материалов типа CuSi_3 достигается достаточно высокое качество обработки (параметр шероховатости $Ra = 0,8\text{—}2,5$ мкм) и обеспечивается увеличение срока службы восстановленных узлов и агрегатов.

МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛА АЛМАЗА ПРИ ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ С МЕТАЛЛО-ОКСИДНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ

Ж.Е. Макарова¹, А.В. Францкевич¹, Г.Г. Манукян²

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь; mzhe_miam@tut.by

²Институт общей и неорганической химии НАН Армении, Ереван, Армения

При фрикционном взаимодействии двух поверхностей имеет место и химическое взаимодействие ювенильных поверхностей с атмосферой, приводящее к образованию оксидов, изменению механизма и интенсивности изнашивания. Повышение температуры в зоне фрикционного контакта интенсифицирует химическую составляющую изнашивания поверхности. Изменение превалирующего износа поверхности может быть достигнуто и за счет искусственного усиления химической составляющей воздействия на одну из обрабатываемых поверхностей в зоне фрикционного контакта.

Целью исследования являлось определение влияния химического взаимодействия в зоне фрикционного контакта композиционный материал — алмаз на изнашивание алмаза. Основой композиционного материала являлась система железо — оксид меди — связующее и система железо — оксид железа — нитрат калия — связующее. Поликристалл синтетического алмаза (пластина массой 132,2 мг) обрабатывали (шлифовали) на круге формы 6А2 с шириной слоя композиционного материала 15 мм. Скорость вращения круга 3000 об/мин. Структуры композиционных материалов железо — оксид меди — (нитрат калия) — связующее представляет собой частицы железа размером 315—50 мкм, между которыми располагаются прослойки из матрицы на основе оксида (нитрата калия) и связующего.

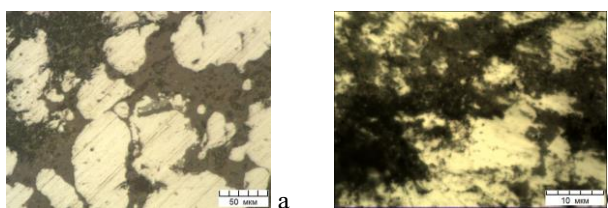


Рис. 1. Морфология поверхности композиционных материалов: а — железо — оксид меди; б — железо — оксид железа — нитрат калия

Обработка поликристалла алмаза композиционными материалами сопровождается изменениями морфологии их поверхности (рис.1). На поверхности частиц железа и матрицы появляются царапины, ориентированные в направлении шлифования. После шлифования поликристалла алмаза композиционным материалом железо-оксид железа-нитрат калия, частицы нитрата калия, содержащиеся в матрице, разрушены, на поверхности частиц железа формируется волокнистый микрорельеф. Изменение массы поликристалла алмаза (1,1 мг после шлифования в течение 10 мин.) отмечается после шлифова-

вания композиционным материалом, содержащим нитрат калия. Микрорельеф на поверхности поликристалла после шлифования композиционным материалом с нитратом калия сглажен (рис. 2).

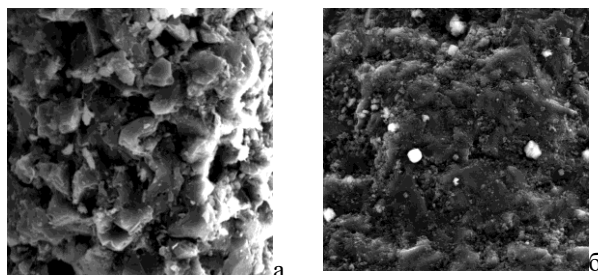


Рис. 2. Морфология поверхности поликристалла: а — исходное состояние, б — после шлифования.

Изменения массы поликристалла после шлифования может быть связано с разрушением и выкрашиванием алмазных зерен, либо с их изнашиванием. Выкрашивание и разрушение алмазных зерен происходит в условиях динамического (ударного) характера взаимодействия алмазных зерен с композиционным материалом и абразивного износа. Однако, формирование на поверхности композиционного материала микрорельефа, характерного для абразивного механизма изнашивания обусловлено воздействием на поверхность композиционного материала частиц оксида железа и связующего, а не осколков алмазных зерен. Поверхность поликристалла сглажена, на ней отсутствуют отпечатки характерные для выкрашившихся зерен. Образование на поверхности частиц железа волнистого микрорельефа, отсутствие в связке частиц нитрата калия, свидетельствуют о повышенной температуре в зоне фрикционного контакта поликристалла и композиционного материала, плавлении и переносе расплава нитрата калия на поверхность частиц железа (рис. 1, б).

Повышение температуры в зоне фрикционного контакта до температуры существования жидкой фазы (620—700 К) приводит к выделению кислорода. В этих условиях износ поликристалла может происходить преимущественно по адгезионному механизму, стадией которого является взаимодействие алмаза с аморфным кислородом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора T17APM-016.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙЮ.Ю. Маховская¹, И.Н. Ковалева²¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; makhovskaya@mail.ru²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель; innakov@tut.by

Введение. Шероховатость технических поверхностей является их неотъемлемым свойством, связанным с технологией их формирования [1]. Эта шероховатость оказывает существенное влияние на силы адгезионного притяжения поверхностей, которые зависят от точной геометрии зазора. Модели адгезионного взаимодействия номинально плоских шероховатых поверхностей строились в [2, 3]. В настоящей работе предложена модель и проведен расчет для случая адгезионного взаимодействия сферического индентора с шероховатым упругим образцом.

Описание модели. Рассматривается контактное взаимодействие жесткого сферического индентора с гладкой поверхностью и упругого шероховатого образца. Шероховатость моделируется системой периодически расположенных одинаковых выступов. Поверхности находятся в адгезионном контакте без трения. Контакт имеет два характерных размера — радиус области контакта на микроуровне a_0 и номинальный радиус области контакта на макроуровне a_1 (рис. 1). При $a_0 \ll a_1$ контакт можно заменить на взаимодействие сферического индентора с гладким упругим полупространством, при этом эффективная удельная работа адгезии w_{eff} определяется реальной удельной работой поверхностей w , параметрами адгезии и поверхностной шероховатости образца [3].

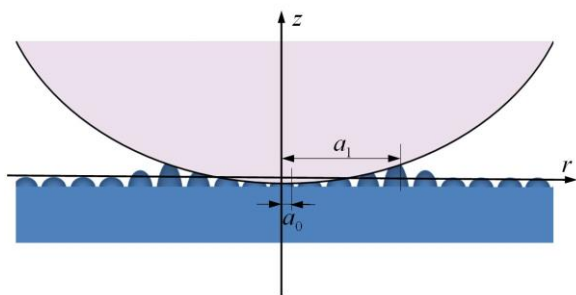


Рис. 1. Схема адгезионного контакта сферического индентора с шероховатым образцом

Модель шероховатого адгезионного контакта строится следующим образом:

1. Решается задача об адгезионном взаимодействии между двумя номинально плоскими поверхностями, одна из которых жесткая и гладкая, а другая принадлежит упругому полупространству и покрыта периодической системой выступов.

2. В результате решения этой задачи строится

зависимость номинального давления от расстояния между номинально плоскими поверхностями, $p(\delta)$.

3. На основании полученной зависимости $p(\delta)$ рассчитывается эффективная работа адгезии по соотношению:

$$w_{eff} = \int_{\delta_0}^{\infty} p(\delta) d\delta \quad (1)$$

где δ_0 — равновесное расстояние между поверхностями, при котором номинальное давление равно нулю, $p(\delta_0) = 0$.

4. Полученное значение эффективной работы адгезии используется для решения контактной задачи на макроуровне — о взаимодействии сферического индентора с гладким упругим образцом.

Определение параметров модели. Проведена экспериментальная оценка шероховатости объектов исследования — стального индентора и образцов. Стандартные высотные параметры шероховатости (R_a , R_z , R_{max}) оценивались с помощью дифференциально-сканирующего интерферометра. Оценка плотности экстремумов поверхности, шагов неровностей и углов наклона их боковых сторон проводилась на программно-аппаратном комплексе Imagesty, реализующем методы восстановления топографии поверхности по изображениям, полученным на растровом электронном микроскопе [4]. Определены механические параметры исследуемых образцов, включая микротвердость и модуль Юнга.

Результаты расчетов. В результате построена зависимость силы, действующей между индентором и шероховатым образцом, от расстояния между ними. Исследовано влияние на эту зависимость параметров шероховатости, а также механических и адгезионных свойств образцов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-58-00014 Бел_а) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (T18P-061).

1. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. — Минск: Беларуская навука. — 2016
2. Маховская Ю.Ю. Дискретный контакт упругих тел при наличии адгезии // Изв. РАН. МТТ — 2003, № 2, 49—60
3. Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Упругий контакт номинально плоских поверхностей при наличии шероховатости и адгезии // Изв. РАН. МТТ — 2017, № 4.101—111
4. Григорьев А.Я. Зависимость формы неровностей технических поверхностей от масштаба // Трение и износ. — 2015 (36), № 5, 477—482

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Мельник

Российский университет транспорта, Москва, Россия; info@rut-miit.ru

Введение, цель, задачи. Трение сопровождается постоянным поступлением энергии в контактирующие тела, прежде всего за счёт самой работы силы трения. Часто трение может сопровождаться и другими видами передачи энергии. Постоянное поступление энергии означает пребывание системы в состоянии, далёком от термодинамического равновесия [1]. В таком случае в системе происходят процессы, стремящиеся свести к минимуму последствия внешнего воздействия (в соответствии с принципом Ле Шателье). Сами последствия внешнего воздействия с точки зрения эксплуатации систем трения рассматриваются как желательные и нежелательные. Применительно к паре трения, включающей контактный провод и токосъёмные элементы электроподвижного состава, для которой производилась экспериментальная оценка зависимости интенсивности изнашивания от состава материала и условий работы, нежелательным последствием считается износ материалов этой пары трения. Износ рассматривается как процесс, требующий затрат энергии на своё осуществление. Но с затратами энергии проходят и другие процессы, также имеющие место при эксплуатации рассматриваемой пары трения. К ним относится образование в процессе трения новой структуры, обеспечивающей минимальную работу трения и за счёт этого способствующей снижению износа.

В соответствии с приведённой точкой зрения поэтому ставится цель разработки материалов, устойчивых к износу при разных режимах работы. Для этой цели ставятся задачи обеспечения перераспределения поступающего потока энергии на осуществление процессов, протекание которых способствует снижению нежелательных явлений, прежде всего износа. Способом осуществления перераспределения энергии с нежелательных явлений считается активизация процессов, также требующих затрат энергии на своё осуществление и при этом завершающихся изменением структуры материалов пары трения. Для решения поставленной задачи поэтому могут использоваться положения термодинамики неравновесных процессов, к которым относится трение.

Теория. Многие процессы, протекающие в неравновесных условиях, сопровождаются изменением структуры вещества не только в результате, но и по мере протекания процесса [1]. Изменённое во время процесса вещество названо диссипативной структурой, а результат процесса — вторичной

структурой [1]. В качестве первой рассматривается и поверхностный слой контактирующих материалов, т.н. «третье тело». Наличием «третьего тела» объясняется наблюдаемый минимум зависимости потерь массы и объёма со временем от показателей условий эксплуатации [2]. Аналогичная зависимость наблюдалась и во всех проведённых экспериментах [3]. Пониженным коэффициентом трения может обладать и возникающая вторичная структура. Её состав позволяет говорить и о протекании при трении химических процессов, требующих затрат энергии для своего осуществления. Считается, что эти химические процессы должны происходить при введении в трущиеся материалы дополнительных веществ (в соответствии с S-теоремой Климонтовича о большей вероятности таких явлений при усложнении состава системы).

Экспериментальные результаты. В проведённых экспериментах материалом токосъёмных элементов был углерод, в который вводили металлы — железо, никелевую сталь, медь с разным содержанием. Вторым телом пары трения был медный контактный провод. Испытания шли при изменяемых скорости и пропускаемом токе. Из полученных результатов особый интерес вызвала зависимость показателей износа от природы вещества пары трения. Все они показали снижение износа каждого из трущихся тел при наличии дополнительно введённого наиболее химически активного металла [3]. Но при этом имеется максимальное значение содержания вводимого металла, после которого разрушение усиливается. Имеет место и перемещение минимума износа в различные условия работы при разном составе трущихся тел и других меняющихся условиях. Эти факты объясняются наличием структурообразования в процессе трения с возможностью повлиять на протекающие при трении процессы. Полученные результаты нужны для дальнейшего поиска подверженных трению материалов, в том числе работающих в разных условиях эксплуатации.

1. Пригожин И.Р., Кондепуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. — 416 с.
2. Федоров С.В. Основы трибозергодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. Калининград, КГТУ, 2003. — 415 с.
3. Гершман И.С., Мельник М.А., Гершман Е.И. Разработка износостойких токосъёмных материалов на основе интенсификации несамопроизвольных химических процессов. Материаловедение, 2013, № 4, с. 40—47

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БРОНЗ РАЗНЫХ МАРОК НА ФРИКЦИОННО-ИЗНОСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ТРЕНИЯ

В.К. Меринов, А.Н. Сенатрев, Т.А. Ахметов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,
vitali.merinov@gmail.com

ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Беларусь

Введение. Повышение основных эксплуатационных свойств композиционных материалов на политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) матрице достигается путем введения волокнистых и дисперсных наполнителей различной природы, в том числе бронзовых порошков [1]. Целью данной работы является исследования влияния бронз разных марок на фрикционно-износные и физико-механические характеристики фрикционных полимерных композитов.

Материалы и методы. В качестве термостойкой полимерной матрицы композитов использовали ПТФЭ (ГОСТ 10007–80). В качестве наполнителей использовались ультратонкие базальтовые волокна (ТУ 02974686.207–99) и бронзы марок БПП-1 (ТУ 48-21-150–72), БПО (ТУ 48-21-5-72), БПК (ТУ 48-21-721-81), БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613-79), БрО10Ф1 (ГОСТ 613-79). Содержание базальтового волокна во всех композитах было фиксировано, содержание бронзовых наполнителей варьировалось от 2,5 до 12,5 мас.%. Образцы для проведения фрикционно-износных испытаний изготавливали методом прямого прессования при удельной нагрузке 100 МПа с последующей термической и механической обработкой. Термообработка проводилась в электропечи SNOL 180/400. Фрикционно-износные испытания проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал-частичный вкладыш». Материал контртела — сталь марки ст.45 с твердостью до 50 HRC и шероховатостью поверхности трения $R_a = 0,52$ мкм. Приработка композитов проводилась до достижения фактической площади фрикционного контакта не менее 90% от контурной площади. Температура окружающей среды во время испытаний находилась в пределах $T = 22–24$ °С. После приработки и каждого испытания поверхность металлического контртела очищалась от пленки переноса. Фрикционно-износные испытания проводились при удельных нагрузках $P = 1, 2, 4$ МПа и скорости скольжения 1 м/с. Исследование твердости композитов проводилось по методу Бринелля на приборе НР 250 путем вдавливания шарика диаметром 5 мм в поверхность плоскопараллельного образца. Диаметр отпечатка измеряли с точностью до 0,01 мм на микроскопе МИР-12.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при $P = 1$ МПа наибольшей износостойкостью обладают композиты, наполненные бронзой марки БПП-1, при $P = 2$ МПа наибольшую износостойкость

показали композиты, наполненные БрО10Ф1, при $P = 4$ МПа высокой износостойкостью обладают композиты, наполненные БПП-1, БПО, БПК. Максимальной твердостью обладают композиты, наполненные БрО10Ф1. На рис.1 приведена зависимость коэффициента трения f от содержания наполнителей для фрикционных композитов различного состава при $P = 4$ МПа. На рис.2 приведена зависимость твердости НВ от содержания наполнителей для фрикционных композитов различного состава.

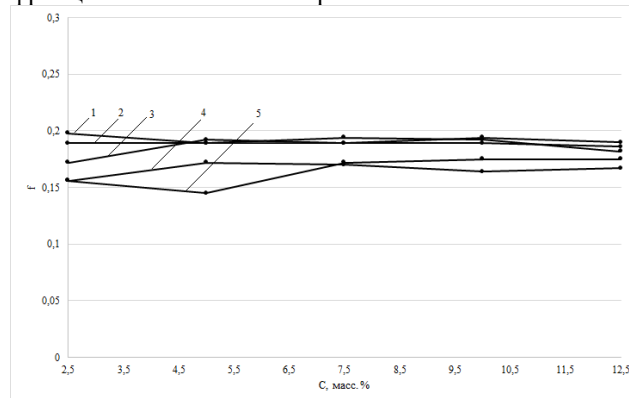


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения f от содержания наполнителя C : 1 — БПП-1; 2 — БПК; 3 — БПО; 4 — БрО5Ц5С5; 5 — БрО10Ф1.

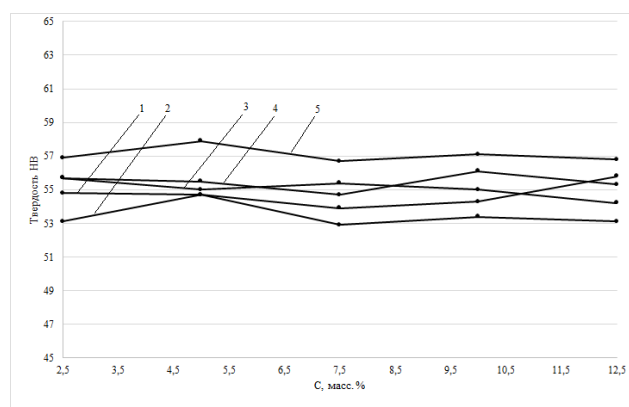


Рис. 2. Зависимость твердости НВ от содержания наполнителя C : 1 — БПП-1; 2 — БПК; 3 — БПО; 4 — БрО5Ц5С5; 5 — БрО10Ф1

1. Триботехнические характеристики фрикционных композитов, модифицированных взвешенными частицами отходящих дымовых газов / Т.А. Ахметов, В.К. Меринов, Н.В. Караполова // Литье и металлургия. — 2018 — № 04(93). — С. 75–83

ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ ОТ КОРРОЗИИ АНТИКОРРОЗИОННЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

С.У. Султанов, М.А. Бабаханова, К.С. Негматова

Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт» Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан; www.gupft.uz

Многие антикоррозионные материалы изготавливают с применением не одного, а нескольких полимеров, их смеси. Свойства таких материалов зависят от состава смеси, свойств её компонентов и их совместимости, режимов смешения и последующих технологических процессов.

Специфика полимерных покрытий, формирующихся из олигомерных систем, заключается в том, что процесс отверждения их связан с протеканием полимеризации на подложке, завершающейся образованием надмолекулярных структур, образующих пространственную сетку [1]. В связи с этим нами разработана полимерная композиция на основе эпоксидной смолы и модифицированная эпоксидная смола с кубовым остатком фурфуролового спирта (КОФС).

Разработанные нами композиции наполненные различными механоактивированными наполнителями отверждаются с помощью реагента-отвердителя — полиэтиленполиамина (ПЭПА).

Формирование дефектов при отверждении покрытий обычно связывается с разрушением пузырей, попаданием пыли, повышенной влажностью воздуха, неравномерным распределением отвердителя в олигомерной системе и неравномерным отверждением разных участков поверхности перегруппировкой структурных элементов под действием внутренних напряжений.

Для оценки влияния температуры отверждения на время высыхания и физико-механические свойства покрытий исследования проведены при температурах от 40 до 200 °С. Процесс высыхания композиции проводился до степени 3, характеризующейся отсутствием следа и прилипания бумаги после снятия нагрузки в 0,2 Н, в соответствии со стандартной методикой [2]. Результаты испытаний представлены в таблице.

Показано, что термоотверждение при температурах до 80 °С проходит в течении длительного времени от 3 до 1,5 часов, при этом сформированные покрытия обладают недостаточно высокими физико-механическими показателями. Проведение процесса сушки при температурах 100—180 °С позволяет при значительно меньших затратах времени получить полностью сформированные покрытия, о чем свидетельствуют высокие показатели твердости, характеризующие степень отверждения. Дальнейшее увеличение температуры приводит к потемнению пленки покрытия.

Таким образом, на основании вышеизложенных можно заключить, что при процессе формирования композиционного покрытия оптимальными температурами отверждения разработанной композиции следует считать 120—140 °С.

Таблица 1. Влияние температуры отверждения на время высыхания композиции, прочность при ударе, адгезию и твердость покрытий на основе КОФС + ЭД-20

Температура, °С	Время отверждения до степени 3, ч	Твердость покрытий, усл.ед.	Адгезия в баллах	Прочность при ударе, кгс.см
50	3	0,35	2	35
80	2	0,37	2	35
100	1,5	0,40	2	35
120	0,75	0,45	1	40
150	0,5	0,47	1	50
200	0,25	0,45	1	40

В отечественной и зарубежной практике для защиты машин, оборудования и аппаратуры от износа и коррозии широкое применение находят покрытия на основе смазок разработанных полимерных материалов, что обеспечивает их длительную сохранность в различных условиях эксплуатации, а также высокие физико-химические, механические свойства.

Известно, что во время эксплуатации лакокрасочное покрытие подвергается разрушающему воздействию различных факторов — воды, кислорода, солнечной радиации, изменения температуры, сернистого и других газов, содержащихся в воздухе промышленных районов, пыли, солей и др.

Использование наполнителей (каолин, лигнин, отход золотоизвлекательной промышленности) позволяет значительно улучшить комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств.

Таким образом видно, что наполнитель проявляет определенный положительный эффект и увеличивает путь прохождения агрессивной среды в глубь матрицы. Разработанный композиционный полимерный материал может быть успешно применен для покрытия узлов машин, работающих в агрессивных условиях.

1. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий — М.: Госхимиздат. — 1989
2. Фомин М.Н., Емельянов Ю.В. Защитные покрытия в химической промышленности. — М.: Химия. — 1981

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ТАНТАЛА И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

А.С. Петровская¹, Г.Б. Мельникова¹, Т.А. Кузнецова¹,
С.А. Чижик¹, А.В. Зыкова², В.И. Сафонов²

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
agata.petrovskaya@gmail.com

²Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Введение. Развитие малоинвазивных технологий в медицине привело к разработке стентов для коронарного шунтирования. Для изготовления современных стентов используют как полимеры, так и металлы, наиболее широко распространены сталь и легированные сплавы титана, хрома и кобальта. В настоящее время существует ряд нерешенных проблем, связанных со стентированием, а именно биообрастание поверхности используемых материалов. Поэтому для улучшения характеристик их поверхность покрывают различными типами покрытий [1]. Одним из наиболее перспективных составов для стентов из нержавеющей стали является тантал, обладающий хорошей биосовместимостью, механической прочностью, коррозионной стойкостью и рентгеноконтрастностью. При эксплуатации стентов важной поверхностной характеристикой является коэффициент трения. Большой коэффициент трения увеличивает риск миграции клеток на стенте и вызывает трудности при его установке. Нанесенное на имплантат покрытие позволяет снизить значение коэффициента.

Целью данной работы является определение коэффициента трения и шероховатости наноструктурированных пленок тантала и его соединений на подложках стекла и нержавеющей стали типа 316 LSS с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Методы и материалы. Подготовка образцов проводилась в Харьковском физико-техническом институте НАН Украины. Подложки из стали и стекла очищались в ультразвуковой ванне по стандартной методике и пучком ионов средних энергий в атмосфере аргона. После чего на них наносились покрытия Ta, Ta₂O₅, TaN, TaON методом реактивного магнетронного распыления [2]. Исследование микроструктуры и физико-механических характеристик поверхности проводили на приборе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь). Для определения коэффициента трения использовали стандартные кантилеверы NCS 11 («Mikromasch», Эстония), с жесткостью 3 Н/м. При определении коэффициента трения радиус кривизны кантилевера увеличивали до 100 нм путем сканирования поверхности кремния при увеличенных нагрузках.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований было установлено, что

микроструктура поверхности покрытий зависит от используемой подложки. Поверхность нержавеющей стали имеет ячеистую структуру со среднеквадратичной шероховатостью (Rq) 5,0 нм и коэффициентом трения 0,072. После напыления на нее пленок Ta, TaN или TaON ячеистая структура сохраняется, однако присутствует двухфазность в режиме латеральных сил. При этом, в случае нанесения пленок TaN, TaON, значения Rq увеличиваются до 7,0–8,0 нм и остаются в пределах 5,0 нм при нанесении Ta. После нанесения на сталь данных наноструктурированных пленок коэффициент трения уменьшается и составляет 0,014 (Ta) и 0,019 (TaN и TaON). Для поверхности Ta₂O₅ на стали характерны неравномерная островковая локализация частиц и коэффициент трения 0,041. Таким образом, все нанесенные пленки тантала и его производных на сталь значительно уменьшили коэффициент трения. Для поверхности стекла характерны разнонаправленные ориентированные полосы, с Rq равной 3,0–4,0 нм и коэффициентом трения 0,026. Напыление пленок Ta₂O₅ или TaON на предметное стекло позволило получить гладкую ячеистую поверхность с минимальными значениями Rq. Однако после нанесения Ta₂O₅ на поверхность стекла происходит увеличение коэффициента трения до 0,038. В случае пленки TaON коэффициент трения составляет 0,016. Из этого следует, что пленки TaON более предпочтительны для изготовления стентов.

Заключение. На основании проведенных исследований методом АСМ установлено, что формирование наноструктурированных пленок соединений тантала позволяет существенно снизить коэффициент трения используемых подложек, и может найти применение в качестве перспективных материалов для изготовления стентов, которые позволяют поддерживать и не снижать кровоток по стенкам сосуда.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Ф18УКА-015 и гранта Национальной академии наук Украины № 17-3-18.

4. Коган М. И., Шводский С.В. Направления и перспективы в разработке урологических стентов (обзор литературы) // Экспериментальная и клиническая урология. — 2014, № 4, 64–71

3. Melnikova G. B. [et al] Structure of Tantalum and Tantalum Oxide Coatings on Steel and Glass Surfaces // International Journal of Nanoscience. — 2019
<https://doi.org/10.1142/S0219581X19400787> (In press)

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ПТФЭ/СЛОИСТЫЙ СИЛИКАТ

С.А. Слепцова¹, С. Лаукканен¹, А.А. Охлопкова^{1,2}, П.Н. Тарасова¹

¹Северо-Восточный федеральный университет, Якутск, Россия; ssard@yandex.ru

²Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

Известно, что этап приработки характеризуется выглаживанием микронеровностей и установлением оптимальной шероховатости поверхностей, сопровождается пластической деформацией поверхностных слоев, разрыхлением и аморфизацией структуры материала. Эти процессы, наряду с высокой локальной температурой [1] приводят к тому, что на поверхности трения формируется слой вторичной структуры, отличающийся по свойствам от основной части композиционного материала, определяющий закономерности и механизм процесса изнашивания.

Цель — исследование свойств и структуры поверхности трения композитов на основе ПТФЭ.

Объекты и методы исследования — композиты на основе ПТФЭ и слоистых силикатов (СС); исследованы их триботехнические характеристики в период приработки и после него по ГОСТ 11629–75 на универсальном трибометре UMT-3 (CETR, США) по схеме трения «палец-диск», при нагрузке — 2 МПа и скорости скольжения — 0,2 м/с; структурные характеристики — методом РЭМ на «JSM-7800F» фирмы JEOL (Япония) с приставкой Oxford Instruments для рентгеновского энергодисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение. Значительное повышение износостойкости композитов ПТФЭ/СС вызывает необходимость изучения триботехнических характеристик материалов в соответствии со структурными изменениями поверхности трения этих композитов. Исследование триботехнических характеристик материалов показывает значительное повышение износостойкости уже при ведении 2 мас.% СС. Предварительная механическая активация наполнителей значительно сокращает период приработки.

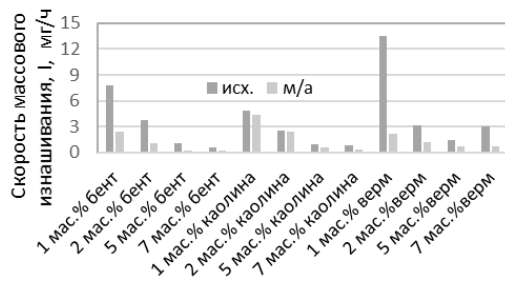


Рис. 1. Износостойкость композитов в зависимости от активации в период приработки

Особенностью композитов, содержащих СС, является формирование на поверхности трения тонкого защитного слоя, отличающегося даже визуально по своей консистенции (рис. 2).

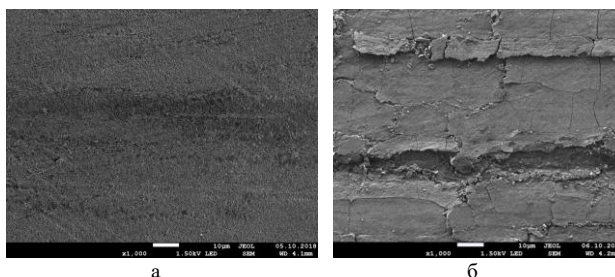


Рис. 2. Поверхности трения исходного ПТФЭ (а) и композита ПТФЭ/СС. Увеличение $\times 1000$

Консистенция слоя напоминает мелкодисперсную массу и выполняют роль твердой смазки, защищающей поверхность материала от истирания. Слой сформирован, очевидно, из частиц износа, появляющихся в большом количестве в начале истирания, и попадающих на поверхность трения [2]. Частицы износа, циркулируя по поверхности трения, претерпевают механохимические процессы диспергирования, дефрагментации, активации, окисления. Формирующийся защитный слой, благодаря содержащимся в них частицам силикатов, обладает малым сопротивлением сдвигу, соответственно, способен скользить относительно поверхности контртела и поверхности композита по направлению сдвига. Кроме того, благодаря пластичности защитный слой сглаживает поверхность трения, заполняя впадины и неровности, а также выравнивая микровыступы и микрошероховатости.

В зависимости от состава СС выявлено формирование 2 типов вторичных структур на поверхности трения, подходящих под описание Костецкого: пластичные и хрупкие [3].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по Государственному заданию № 11.1557.2017/4.6.

1. Хайнике Г. Трибохимия: Пер. с англ. — М.: Мир. — 1987.
2. K.L. Harris, A.A. Pitenis, W.G. Sawyer, B.A. Krick, G.S. Blackman, D.J. Kasprzak, and C.P. Junk. PTFE Tribology and the Role of Mechanochemistry in the Development of Protective Surface Films//Macromolecules 2015, (48), 3739—3745.
3. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. — Киев: Техника — 1970.

Трибологические свойства покрытий Mo-S-C, полученных со-осаждением Mo и C из лазерной плазмы в сероводороде

В.Ю. Фоминский, А.А. Соловьев, Д.В. Фоминский, В.Н. Неволин, Р.И. Романов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия; vyfominskiy@mephi.ru

Интерес исследователей и практиков к надежным антифрикционным покрытиям постоянно возрастает вслед за прогрессом в развитии высоких технологий и сложных механических устройств, способных функционировать в осложненных условиях. Нанокompозитные покрытия, содержащие твердосмазочный компонент, в частности, MoS_2 , MoSe_2 и др., и твердую нанofазу типа алмазоподобного углерода, достаточно хорошо исследованы как с точки зрения понимания их структурообразования, так и механизма трения и износа. Основной метод получения таких покрытий — это ионно-плазменное (магнетронное) осаждение [1].

Особенности структуры и свойств покрытий такого типа, создаваемых импульсным лазерным осаждением (ИЛО), исследованы в основном для селенидов переходных металлов [2]. Применение ИЛО для получения покрытий Mo-S-C практически не исследовалось по причине имеющейся специфики лазерной абляции мишеней MoS_2 , проявляющейся в интенсивном образовании частиц субмикронных и нанометровых размеров.

Цель работы заключалась в исследовании особенностей формирования и измерении трибологических характеристик нанокompозитных Mo-S-C покрытий при использовании метода реактивного ИЛО, исключающего внедрение частиц MO в осаждаемые слои.

Материалы и методы. В методе реактивного ИЛО лазерной абляции подвергаются мишени Mo и графита, при этом камера для осаждения заполняется S-содержащим газом (H_2S). Давление сероводорода варьировалось в интервале 7–28 Па. Время попеременного облучения мишеней Mo и C лазерными импульсами наносекундной длительности составляло по 5 мин. Полученные пленки и покрытия исследовались методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской фото-электронной спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света. Трибоиспытания тонкопленочных покрытий толщиной до 200 нм на подложках стали 20X13 проводились на приборе Anton Paar TRB3 при комнатной температуре в режиме возвратно поступательного перемещения стального шарика диаметром 3 мм при нагрузке 1 Н.

Результаты и их обсуждение. Исследования структурного и химического состояния полученных тонкопленочных покрытий показали, что реактивное ИЛО позволяло создавать относительно гадкие и однородные по составу покрытия Mo-S-C. Ре-

зультаты сравнительного исследования коэффициента трения различных покрытий Mo-S-C показаны на рис. 1. Цифрами здесь указаны давление сероводорода, при котором проводилось осаждение покрытий Mo-S-C. Применение комплекса исследовательских методик позволило установить, что в структуре покрытий присутствовали аморфные нанofазы MoS_x и углерода.

Технологическое окно получения качественных по трибологическим характеристикам покрытий Mo-S-C определялось в основном давлением сероводорода, и это окно лежало в диапазоне 7–14 Па. При таких давлениях формирующаяся аморфная нанofаза MoS_2 обладала оптимальной локальной упаковкой атомов, во многом характерной для слоистой фазы MoS_2 . Структурное состояние алмазоподобной углеродной фазы при этом не подвергалось влиянию H_2S , и было во многом аналогично состоянию фазы, формируемой методом ИЛО в вакууме.

Покрытие, полученное при оптимальной давлении 7 Па, обладало наиболее высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения ($\sim 0,1$) практически без этапа приработки в паре трения.

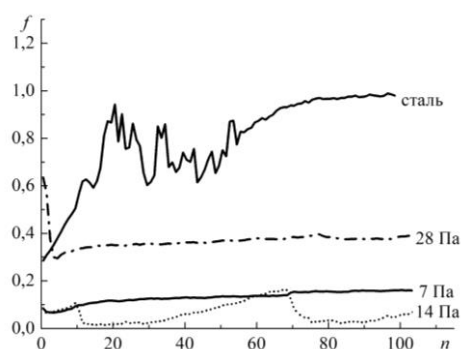


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от числа циклов трибоиспытаний по методике скольжения шарика по диску с покрытием (обратно-поступательные перемещения)

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-19-00081).

1. Colas G., Saulot A., Regis E. and Berthier Y. Investigation of crystalline and amorphous MoS_2 based coatings: Towards developing new coatings for space applications // *Wear* — 2015 (330-331) 448–460
2. Grigoriev S.N., Fominski V.Yu., Romanov R.I. and Gnedovets A.G. Tribological properties of gradient Mo-Se-Ni-C thin films obtained by pulsed laser deposition in standard and shadow mask configurations // *Thin Solid Films* — 2014 (556)

Трибологические свойства композиционных монослоев Ленгмюра — Блоджетт бегеновой кислоты с наночастицами нитрида бора

А.Е. Соломянский, В.Е. Агабеков

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; solasy@mail.ru

Композиционные пленки Ленгмюра — Блоджетт (ЛБ) высших жирных кислот с наночастицами нитрида бора гексагональной аллотропной модификации, 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 монослоев ЛБ бегеновой кислоты (БК) с наночастицами нитрида бора гексагональной аллотропной модификации (α -BN).

Экспериментальная часть

Пленки БК, БК — α -BN формировали методом горизонтального осаждения [3] при поверхностном давлении 45 мН/м на стальных подложках (сталь 12Х17) прямоугольной формы площадью $\sim 1,5$ см². Композиционные ленгмюровские слои БК с наночастицами нитрида бора гексагональной аллотропной модификации (Lowfriction, средний размер частиц ~ 70 нм) формировали из суспензии α -BN в хлороформном растворе БК. Массовое соотношение БК и α -BN в дисперсии составляло 1,0:0,2. Триботехнические испытания покрытий осуществляли на трибометре возвратно-поступательного типа (ИММС НАН Беларуси). Условия тестирования: приложенная нагрузка 0,5 Н, индентор — стальной шарик диаметром 3 мм (сталь 95Х18), длина хода индентора 3 мм, его линейная скорость 4 мм/с. Граничным условием проведения эксперимента являлось значение коэффициента трения $\sim 0,5$ [1].

Морфологию полученных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6000 (JEOL, Япония).

Результаты и их обсуждение

Для формирования упорядоченной и однородной по толщине пленки ЛБ поверхность подложки должна иметь шероховатость $R_{\max}$ не более 50 нм [1] в то время как шероховатость используемой стали $R_{\max} \sim 238$ нм. Наличие частиц α -BN и их агрегатов размером от ~ 210 до 1500 нм в слое БК подтверждено методом СЭМ (Рис. 1).

При нагрузке 0,5 Н монослой БК и композиционное покрытие БК с наночастицами α -BN разрушаются после ~ 48 и 220 циклов скольжения соответственно (Рис 2), при этом немодифицированная стальная подложка изнашивается после ~ 11 циклов скольжения (Рис. 2 кривая 1).

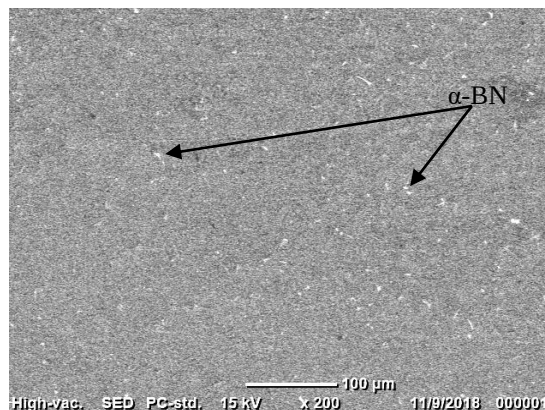


Рис. 1. СЭМ изображение композиционного монослоя БК— α -BN, сформированного на стальной поверхности

Увеличение износостойчивости композиционного покрытия БК — α -BN по сравнению с стабильностью в процессе трения монослоя БК, возможно связано с тем, что частицы α -BN и их агрегаты остаются в зоне контакта поверхностей и предохраняют их от разрушения.

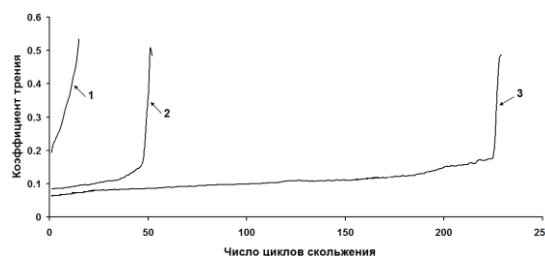


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения: 1 — немодифицированная стальная поверхность, 2 — монослой БК, 3 — композиционный монослой БК — α -BN

Выводы

Введение наночастиц нитрида бора гексагональной аллотропной модификации в монослой бегеновой кислоты в 4,6 раза увеличивает его износостойчивость в процессе трения. Композиционные пленки БК— α -BN могут быть использованы в качестве твердосмазочных защитных покрытий в прецизионных узлах трения.

1. Соломянский А.Е., Жавнерко Г.К., Агабеков В.Е. // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85, 1539—1544.
2. Hussain S. A., Dey B., Bhattacharjee D., Mehta N.// Heliyon. 2018 V.4, P. 1 — 32.
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

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Mo/W/S/Se И АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА

Д.В. Фоминский, В.Н. Неволин, В.Ю. Фоминский, Р.И. Романов, А.А. Соловьев

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия; vyfominskij@mephi.ru

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) при использовании их в качестве покрытий в парах трения обеспечивают заметное снижение коэффициента трения. Основным недостатком этих материалов, заключающийся в низкой износостойкости, решается путем формирования нанокompозитных или многослойных покрытий. При выборе твердосмазочного компонента важно учитывать как его индивидуальные антифрикционные свойства, так и взаимодействие с другими компонентами композитного покрытия, в том числе, при трибовоздействии в паре трения.

В настоящее время основным методом получения твердосмазочных ДПМ-содержащих покрытий является магнетронное осаждение. Импульсное лазерное осаждение (ИЛО) можно рассматривать как альтернативный метод получения ДПМ-содержащих покрытий, так как он обладает рядом интересных особенностей [1]. В частности, метод осаждения легко перевести в режим ионной имплантации [2]. Также, в энергетический спектр ионов импульсной лазерной плазмы простирается в область высоких энергий (≥ 1 кэВ), что открывает новые возможности в получении прочных слоев, в частности, алмазоподобного углерода (DLC). Вариативность метода ИЛО позволяет получать ДПМ-покрытия с разными структурными и химическими свойствами, что может оказывать существенное влияние на их трибологические свойства.

Цель работы заключалась в проведении сравнительных исследований трибологических свойств наиболее актуальных ДПМ покрытий, создаваемых в различных режимах ИЛО. Это исследование дополнено сравнением антифрикционных свойств ДПМ слоев и покрытий DLC, в том числе, легированного бором.

Материалы и методы. Для получения тонкопленочных покрытий MoS_x , MoSe_x и WSe_x метод ИЛО применялся в нескольких вариантах. Было реализовано традиционное ИЛО из мишеней сульфидов и селенидов металлов в конфигурации осаждения по нормали к поверхности подложки, и осаждение скользящим факелом. Также применялся метод реактивного ИЛО металлов в H_2S . DLC покрытия осаждались методом ИЛО из графитовой мишени, а также мишени из спрессованной сажи и порошка В с соотношением C/B = 5/1.

Трибоиспытания покрытий толщиной 100–200 нм на подложках из полированного Si проводились на приборе Anton Paar TRB3 в режиме сколь-

жения шарика по диску. Относительная влажность воздуха < 30%. Эти исследования дополнены комплексом структурного и химического анализа.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведены результаты трибоиспытаний созданных покрытий. Видно, что наиболее низкий коэффициент трения ($f=0,035$) зафиксирован у покрытий $\text{MoS}_2(\text{NA})$, полученных наиболее простым способом ИЛО из мишени MoS_2 по нормали.

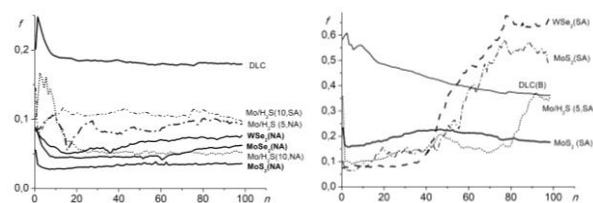


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от числа циклов трибоиспытаний ДПМ и DLC покрытий.

Покрытия $\text{MoSe}_2(\text{NA})$ и $\text{WSe}_2(\text{NA})$ заметно уступали дисульфиду по антифрикционным свойствам. Результат применения реактивного ИЛО зависел от давления H_2S , оптимальное значение которого составляло 10 Па (образец $\text{Mo}/\text{H}_2\text{S}(10, \text{NA})$). Снижение давления до 5 Па вызывало увеличение коэффициента трения от 0,05 до 0,09 (образец $\text{Mo}/\text{H}_2\text{S}(5, \text{NA})$), что могло быть обусловлено формированием нанокompозитного покрытия $\text{Mo}+\text{MoS}_2$.

Осаждение под скользящим углом (SA) позволяло реализовать хорошие антифрикционные свойства ($f \leq 1$) практически для всех материалов. Пониженная долговечность могла быть обусловлена меньшей толщиной осажденных под углом к поверхности слоев.

Алмазоподобные покрытия явно проигрывали ДПМ-содержащим слоям по антифрикционным свойствам.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-19-00081).

1. Grigoriev S.N., Fominski V.Yu., Romanov R.I. and Gnedovets A.G. Tribological properties of gradient Mo-Se-Ni-C thin films obtained by pulsed laser deposition in standard and shadow mask configurations // *Thin Solid Films* — 2014 (556) 35–43.
2. Grigoriev S.N., Fominski V.Yu., Romanov R.I. and Volosova M.A. Structural modification and tribological behavior improvement of solid lubricating WSe_x coatings during pulsed laser deposition in buffer He-gas // *J. Friction and Wear* — 2013 (34) 262–269.

ПОВЕРХНОСТЬ ТРИБОКОНТАКТА ПРИ МЕТАЛЛПОЛИМЕРНОМ ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ ИНКАПСУЛИРУЕМЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Ф.В. Мясников, К.И. Карпенко, Н.А. Мясникова, Е.С. Новиков

ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

Введение. Полимеры и композиционные материалы на основе полимеров играют все более заметную роль среди материалов, используемых в узлах трения современной техники. Как правило, они содержат в своем составе органические и минеральные наполнители, наноразмерные добавки. Для формирования многоуровневых структур на поверхности трибосопряжения нами предложена технология модифицирования полимерной матрицы путем инкапсулирования, то есть введение микрокапсул в оболочки из полимерных материалов, содержащих смазочные материалы, в матрицу разработанных наноконкомпозитов. Микрокапсулирование — качественно новое направление развития науки и техники, интенсивно развивающееся в настоящее время. Смазочное вещество, которым наполнены капсулы, выделяется лишь при наличии нагрузок на поверхности трениях.

Объекты и методы исследования. В данной работе рассмотрены разработка и применение для задач трибологии полимерных композиционных материалов основе термостойкого ароматического полиамида фенилон С-2, наполненных микрокапсулами, содержащими смазочный материал. ФС-2 выступает как в качестве матрицы, так и в качестве оболочек микрокапсул. Преимуществом ФС-2 является то, что он обладает высокими физико-механическими характеристиками, в узлах трения выдерживает рабочие температуры до 250 °С и нагрузки до 25 МПа. Микрокапсулы с полиамидной оболочкой, получали при реакции терефталойлхлорида с гександиаминном. Выбор капсулируемых смазочных материалов ограничен и обусловлен их способностью сохранять смазочные свойства при высоких температурах формования фенилона — до 320 °С, например, индустриальное масло (И-40) и олеиновая кислота (ОлК).

Исследование процесса фрикционного взаимодействия инкапсулированных композитов проводилось на машине трения ИИ 5018 по схеме «палец-ролик» без подвода внешней смазки (палец изготовлен из композиционного материала). Палец и ролик устанавливались на испытательную установку, ролик приводился во вращение с заранее заданной частотой 189 об/мин. Палец приводился в соприкосновение с вращающимся роликом перпендикулярно оси вращения ролика. Диапазон прикладываемой нагрузки составлял 209–1020 Н. В течение всего времени испытаний производилась непрерывная запись момента трения на нижнем валу машины и пересчет коэффициента трения.

Полученные результаты.

На рис. 1 представлены изменения коэффициента трения от времени для различных композиций.

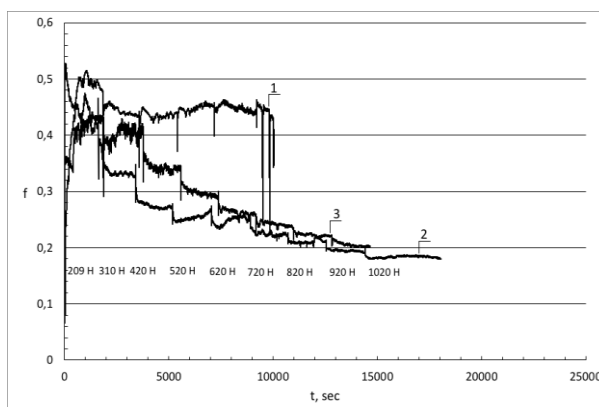


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от времени при изменении нагрузки от 209 Н до 1020 Н и скорости скольжения 0,4 м/с для различных композитов на: 1 — ФС-2; 2 — ФС-2 + 7% капсулы ОлК; 3 — ФС-2 + 7% капсулы И-40

Значительное уменьшение коэффициента трения (от 0,45 до 0,18–0,2) для исследованных инкапсулированных полимеров свидетельствует о том, что наполненные микрокапсулами полимерные композиты способны создавать ориентированную смазочную пленку на поверхностях трибосопряжения. Различия трибологических характеристик некапсулированных и инкапсулированных композитов особенно значительны при высоких нагрузках и больших временах трибоконтакта. При этом коэффициент трения выходит на значение, характерное для данной нагрузки, и сохраняется длительное время.

Благодаря созданию пленки фрикционного переноса, содержащей смазку, на поверхности трибоконтакта обеспечивается лучшая защита контактирующих поверхностей от изнашивания. Использование инкапсулированных композитов в негерметичных узлах трения не приводит к попаданию смазочного материала в окружающую среду и его разбрызгиванию, поэтому такие композиты можно рассматривать как экологически безопасные и перспективные материалы для узлов трения. Все это предопределяет их более высокую эксплуатационную применимость.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научных проектов №18-58-00026 и № 17-20-03176.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПТФЭ,
СОДЕРЖАЩИЕ СИЛИКОНОВОЕ МАСЛО

А.Л. Федоров, М.А. Маркова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия; gelvirb@mail.ru

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) являются одним из наиболее распространенных материалов, применяемых в ответственных узлах трения, т.к. обеспечивают стабильную эксплуатацию в условиях агрессивных сред, глубокого вакуума и при криогенных температурах [1]. ПТФЭ привлекает к себе внимание материаловедов-трибологов прежде всего благодаря низкому коэффициенту трения, что позволяет использовать его в различных узлах трения без смазки. Однако из-за низкой износостойкости и высокой ползучести ПТФЭ в чистом виде не используется в узлах трения. Обычно применяют композиции на его основе с различным содержанием и сочетанием наполнителей, поэтому ПТФЭ является основой многих композитов. С другой стороны, наполненные композиты на основе ПТФЭ характеризуются не только повышенной износостойкостью, но и увеличенными значениями коэффициента трения по сравнению с исходным полимером [2]. В связи с этим, в данной работе поставлена задача повышения износостойкости ПТФЭ с сохранением коэффициента трения на низком уровне.

Объекты и методы исследования. В качестве образцов для испытаний использован политетрафторэтилен (фторопласт-4) марки ПН (ГОСТ-10007-80) с пористой структурой.

В качестве пропитывающей жидкой смазки использован полидиметилсилоксан DOWCORNING 200 Fluid 50CS.

Пористость определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898-89.

Триботехнические характеристики (коэффициент трения, скорость массового изнашивания) определяли на машине трения ИИ-5018. Схема трения столбик-торец диска, прижимающая сила 134 Н (1,7 МПа), скорость скольжения — 0,5 м/с, путь трения — 5,5 км. Исследуемый образец цилиндр диаметром 10 и высотой 15 мм; контртело — диск диаметром 49 мм из стали 45 с твердостью 45—50 HRC.

Результаты исследования и их обсуждение. Для обеспечения введения жидкой смазки в объем композита использовали способ получения пористых заготовок (рис. 1), в котором в роли порообразователя выступает хлорид натрия, впоследствии удаляемый из объема полимерной матрицы путем растворения водой. После вымывания соли полимерные пористые заготовки подвергались термообработке, после чего пропитывались силиконовым маслом.

Результаты исследования триботехнических

характеристик композитов на основе ПТФЭ и полидиметилсилоксана приведены в табл. 1.

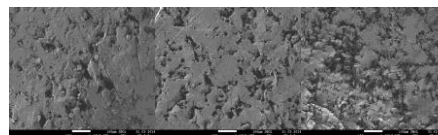


Рис. 1. Электронные микрофотографии срезов пористого ПТФЭ, полученных вымыванием образцов с различным содержанием соли: а) 20%; б) 25%; в) 30% (увел. x150)

Таблица 1. Триботехнические характеристики ПТФЭ в зависимости от содержания силиконового масла

Состав	C_{NaCl} , мас. %	$C_{масла}$, мас. %	μ , %	I , мг/ч	f
ПТФЭ	-	-	6,4	420,5	0,16-0,18
	20	-	26,1	149,5	0,14-0,18
	25	-	30,4	-	-
	30	-	34,8	-	0,15-0,17
ПТФЭ + силиконовое масло	20	14,3	-	18,8	0,08-0,09
	25	23,9	-	13,2	0,04-0,05
	30	29,7	-	11,8	0,04-0,05

Примечание: C_{NaCl} — содержание соли в заготовках; $C_{масла}$ — содержание масла; I — скорость массового изнашивания, f — коэффициент трения.

Из таблицы видно, что повышение концентрации хлорида натрия в полимерных заготовках приводит к повышению пористости композита. Повышение пористости способствует улучшению сорбции масла в объем композита, что в свою очередь приводит к повышению износостойкости в 35 раз и снижению коэффициента трения в 3,5—4 раза по сравнению с исходным полимером. Уменьшение коэффициента трения происходит за счет выдавливания масла из объема полимера на поверхность трения, благодаря чему реализуется режим трения со смазкой, что также способствует повышению износостойкости.

Заключение. Показано, что силиконовое масло способствует снижению коэффициента трения композитов, а также снижению скорости массового изнашивания.

- Охлопова А.А., Адрианова О.А., Попов С.Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. 224 с.
- S.K. Biswas. Friction and wear of PTFE — a review // Wear. 1992. V. 158. P. 193—211.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Т.Г. Федорова

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
fedorova.tatyana2011@gmail.ru

Введение. Топографию поверхностей трения определяют многими методами, один из которых конфокальная лазерная микроскопия. Конфокальная микроскопия (CLSM) является техникой оптического неразрушающего профилирования высокого разрешения 3D поверхностей микроструктур. Приборы, реализующие этот метод, обладают существенным контрастом по сравнению с обычными классическими микроскопами. Отличительной особенностью данного метода является использование диафрагмы, способной отсекают поток фонового рассеянного света.

— Конфокальная микроскопия обладает несколькими преимуществами по сравнению с атомно-силовой микроскопией:

— Большее поле сканирования.

— Большую скорость сканирования (10-5000 мс/пиксел).

Является неразрушающим методом сканирования. Не имеет артефактов связанных с взаимодействием зонда и поверхностей исследования.

В конфокальном микроскопе в каждый момент времени происходит регистрация изображения одной точки объекта. Полноценное изображение получается за счет сканирования передвижения образца или перестройки оптической системы [1].

Цель. Установка возможностей лазерной сканирующей микроскопии для применения ее в оценке морфологии поверхностей трения. Получение изображений исследованных образцов. Оценить изображения поверхностей после трения и сделать выводы о смазках.

Материалы и методы исследований. Для исследования морфологии поверхностей трения использовали метод лазерной сканирующей микроскопии, реализованный в приборе МАН-ИНВЕСТ-ЛСДФМ-05 (МАН Инвест, Украина).

В качестве объектов исследований были выбраны стальные поверхности (сталь 3) размерами 15×15 мм. Исследовали поверхности после трения в присутствии смазочных материалов на основе индустриального масла И-20, наполненного присадками. В качестве присадок использовали фторопластовый порошок различной дисперсности.

Предварительно образцы подверглись трению на машине трения СМТ-1 по схеме «ролик-частичный вкладыш»; скорость скольжения 1 м/с; нагрузка 300 Н. Методом лазерной сканирующей микроскопии, с использованием объектива F = 16, получили изображения поверхностей после трения и

некоторые параметры шероховатости исследованных образцов.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1 представлены изображения поверхностей исследуемого образца после трения со смазочным материалом И-20, что позволило оценить степень разрушения образца и выявить присутствие усталостного износа, а по рис. 2 — присутствие абразивного износа.

По представленным изображениям топологии поверхностей после трения со смазочным материалом, модифицированным присадкой 2 на рис. 3 выявлено $Ra = 0,132$ мкм, что свидетельствует о наименьшей степени износа образца по сравнению с предыдущими.

Таким образом образец 3 показал наилучшие показатели среди испытанных, что делает нецелесообразным использование присадки 1.

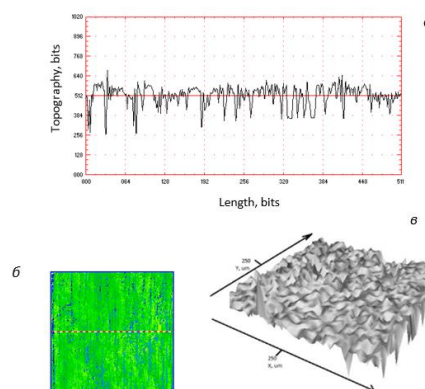


Рис.1. Изображения поверхности после трения со смазочным материалом И-20: а — профиль поверхности со значением $Ra = 0,286$ мкм, б — 2D-изображение поверхности, в — 3D-изображение.

В результате проведенных исследований получены 2D- и 3D-изображения исследуемых образцов. Результаты испытаний представляют ценную информацию об эффективности исследуемых присадок. Оценивая изображения контактирующих поверхностей установлено, что смазочный материал, модифицированный присадкой 2 позволяет увеличить износостойкость.

1. Лежнев, Э.И. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия: принципы, устройство, применение / Э.И. Лежнев, И.И. Попова, С.В. Кузьмин, С.М. Слащев // Журн. научное приборостроение. — 2001. — Т. 11, Вып. 2. — С. 3—20.

САМООРГАНИЗАЦИЯ В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ С ПОКРЫТИЯМИ

М.Л. Хейфец¹, Н.М. Сенють¹, А.Г. Колмаков², С.А. Клименко³

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

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

При обработке и эксплуатации поверхностный слой поглощает значительное количество энергии, при этом в нем образуются аккумулирующие избыток энергии неравновесные структуры. Обладающие высокой энергией неустойчивые структуры самопроизвольно стремятся к состоянию с меньшей свободной энергией, которое обеспечивает повышение износостойкости и др. характеристик поверхности.

Цель работы — в соответствии с делением по концентрации энергии, позволяющим описать взаимодействие потоков с обрабатываемой и эксплуатируемой поверхностью, провести физико-химический анализ структур поверхностного слоя.

Анализ проводился согласно уравнению фаз Гиббса: $K + P = \Phi + C$, для числа компонентов K вещества, потоков P энергии, фаз Φ и термодинамических степеней свободы C системы на различных стадиях технологических операций и эксплуатации поверхностей изделий.

Распределенная зона тепловыделения формировалась в процессе нанесения покрытия и резания с плазменным нагревом. Поскольку использовались однородные материалы, число компонентов $K = 1$. Плазменный нагрев, нормальные и касательные нагрузки, обеспечивающие как трансляционные, так и ротационные составляющие деформации, определяют число налагаемых полей $P = 3$. Дополнительная подвижность режущей кромки инструмента в широком диапазоне скоростей обеспечивает степень свободы $C = 1$ системе и формирует $\Phi = 3$ фазы: покрытие большой толщины (2...5 мм), зоны термического влияния и деформационного упрочнения. Для создания дополнительно $\Phi = 4$ зоны термодинамического упрочнения необходимо фиксировать скорость кромки инструмента и лишать технологическую систему степени свободы $C = 0$. Из этого неустойчивого состояния посредством самоорганизации система стремится к устойчивому состоянию $C = 2$, при котором на всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы $\Phi = 2$.

Множество локальных источников проявляло себя в процессах электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием. Использовались ферромагнитные порошки, которые наносили тонким слоем (до 0,5 мм) на стальную основу, поэтому $K = 2$. Электромагнитные поля определяют $P = 2$. Термомеханические процессы обеспечиваются $C = 2$ степенями свободы системы и формируют $\Phi = 2$ фазы: покрытие и основу. Интенсивный нагрев не обеспечивает дисперсную структуру верх-

него слоя. При температурных градиентах, необходимых для структурных превращений, тепловой поток направляется в подложку, в результате появляется зона — термического влияния, фаз становится $\Phi = 4$ и система лишается степеней свободы $C = 0$. Структурные превращения происходят по всей глубине покрытия $\Phi = 3$, в том случае когда сохраняется возможность теплоотвода $C = 1$ в основу.

Сфокусированный источник представлял собой электронный или лазерный луч в процессе нагрева поверхности с покрытием. В этих методах используется $K = 2$ компонента — материал основы и материал покрытия (толщиной 2...6 мкм). Число потоков энергии $P = 2$ — осаждаемый поток, а также электронный, лазерный луч. Широкий диапазон интенсивности излучения обеспечивает системе степень свободы $C = 1$ и формирует $\Phi = 3$ фазы — покрытие, основу и зону термического влияния. Образование ячеек при лучевом оплавлении поверхности формирует новую фазу $\Phi = 4$ и лишает систему степени свободы $C = 0$. Из этого состояния система стремится к состоянию с $C = 2$ степенями свободы. В результате формируется единая фаза, которая вместе с основой образует $\Phi = 2$ и обеспечивает $C = 2$ степени свободы для регулирования интенсивностей формирования покрытия и его лучевой обработки.

При эксплуатации деталей участвуют два контртела и окружающая среда $K = 3$. Процессы носят термомеханический характер $P = 2$. В ходе приработки на поверхностях контртел образуются легированные кислородом аморфно-кристаллические сплавы и количество фаз возрастает до $\Phi = 5$, что лишает систему степеней свободы $C = 0$ и делает это состояние неустойчивым. На стадии установившегося износа в процессе трения образуется единый для контртел сплав, количество фаз сокращается до $\Phi = 4$ и появляется степень свободы $C = 1$, обеспечивающая поступательное взаимоперемещение сопрягаемых тел. При разрушении поверхности образуется еще одна степень свободы $C = 2$ вследствие вращения выкалываемых частиц, а число фаз $\Phi = 3$ становится равным числу компонентов.

Заключение. В поверхностном слое происходят необратимые процессы самоорганизации, которые при совместных действиях потоков энергии и вещества ведут к образованию комплекса структур.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке фондов БРФФИ-РФФИ по проекту T16P-176.

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТРЕНИЯ ДИСКОВОГО ТОРМОЗА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Ю.И. Осенин¹, О.В. Малахов², В.В. Малахова², А.В. Чесноков³

¹Бердянский университет менеджмента и бизнеса, Украина;

²Физическое лицо, Украина;

³Технологический университет, Россия chesnokov@ut-mo.ru

В настоящее время управления дисковыми тормозами подвижного состава железных дорог осуществляется по критерию проскальзывания колес относительно рельсов. Недостатком этого метода является отсутствие возможности плавного регулирования характеристик трения дисковых тормозов.

В связи с этим, интерес представляет метод управления характеристиками дискового тормоза за счет периодических импульсных силовых воздействий на элементы трения в нормальном и тангенциальном направлении относительно плоскости их взаимодействия [1].

С целью подтверждения возможности практической реализации этого метода был проведен эксперимент на специально спроектированном стенде. Основой стенда являлся узел трения, моделирующий рабочие элементы дискового тормоза, выполненный в масштабе 1:100. Материалы пары узла трения: «сталь — бронза». Силовой привод — электродвигатель постоянного тока мощностью 0,1 кВт. Периодическое импульсное воздействие на рабочие элементы пары трения в нормальном направлении осуществлялось с помощью магнитодинамического привода, который позволял реализовать последовательность силовых импульсов в диапазоне частот $10 \div 5 \cdot 10^2$ Гц. Момент трения оценивался косвенным путем на основе данных измерения значений силы тока якоря электрического двигателя компенсационным методом.

Подторможенный колодкой диск раскручивался электродвигателем до достижения установившегося режима вращения с частотой 150 об/мин., при этом, нормальное нагружение элементов узла трения находилось в диапазоне $N_0 = 3 \div 5$ Н (участок характеристики I, рис.1).

В момент времени t_1 включался магнитодинамический привод, добавляющий к статической величине установленной нормальной силы прижатия элементов трения N_0 динамическую составляющую с амплитудой A_0 и частотой f

$$N(t) = N_0 + A_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t).$$

При условии, что амплитуда динамической составляющей нормальной силы была меньше статической силы прижатия N_0 .

В результате, наблюдалось увеличение силы

трения в исследуемом узле трения (участок характеристики II, рис.1).

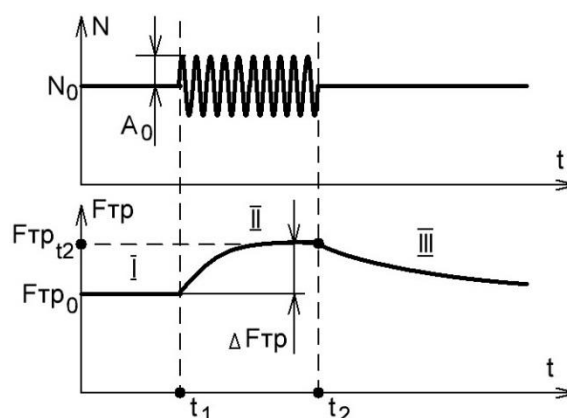


Рис. 1. Иллюстрация эксперимента

После отключения магнитодинамического привода и снятия динамической составляющей силы прижатия в момент времени t_2 , величина силы трения возвращалась, с некоторым запаздыванием, к исходным значениям (участок характеристики III, рис.1).

Получена зависимость коэффициента трения от частоты импульсного силового воздействия (рис. 2).

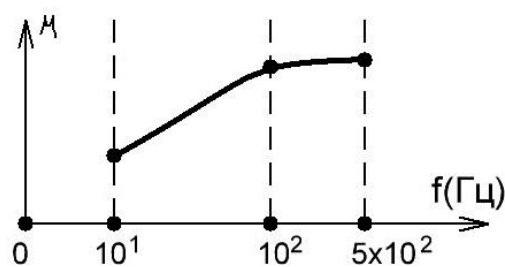


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от частоты

Проведение эксперимента позволило установить, что периодическое импульсное силовое воздействие на элементы трения, может быть использовано как управляющий фактор коэффициентом трения дискового тормоза.

1. Патент України на корисну модель № 9537, МПК В 60Т 7/00. Спосіб керування гальмом залізничного транспортного засобу / Осенин Ю.І., Ладік Ю.Е.; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10, 2005р.

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАБОЧИХ ПЛОЩАДЕЙ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ И ТОРМОЗНОГО ДИСКА ДИСКОВОГО ТОРМОЗА НА УРОВЕНЬ ШУМА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Ю.И. Осенин¹, А.В. Чесноков², Ю.В. Кривошея³, В.В. Бугаенко⁴

¹Бердянский университет менеджмента и бизнеса, Украина;

²Технологический университет, Россия; chesnokov@ut-mo.ru

³Донецкий институт железнодорожного транспорта, Украина;

⁴Физическое лицо, Украина

Шум, возникающий при торможении подвижного состава железных дорог, является одной из главных проблем дисковых тормозов. Несмотря на многие десятилетия использования дисковых тормозов, эта проблема до сих пор не нашла своего рационального решения.

Шум при торможении имеет не только технический, но и социальный характер, так как он находится в области частот, наиболее чувствительных для восприятия человеком. Особенно остро влияние шума на человека сказывается в момент, предшествующий полной остановке подвижного состава.

Анализ силового взаимодействия элементов дискового тормоза при торможении показал, что одной из причин возникновения шума могут быть деформации микрогеометрии поверхности элементов дискового тормоза и ее упругое восстановление [1], которое инициирует возникновение колебаний, в том числе звукового диапазона частот, в поверхности тормозного диска, [2, 3]. При этом, поверхность тормозного диска, которая находится в области контакта с тормозной колодкой, в меньшей степени генерирует шум, так как она демпфируется тормозной колодкой.

С целью оценки взаимосвязи между деформацией микрогеометрии поверхности, при трении, и площадью поверхности тормозного диска, которая излучает звуковые волны, был проведен эксперимент. Суть эксперимента заключалась в определении уровня шума при силовом взаимодействии кольцеобразных элементов трения диаметром 50 мм, которые моделировали рабочие элементы дискового тормоза. Эксперимент проведен для соотношения рабочих площадей кольцеобразных элементов: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 (соотношение площадей достигалось за счет симметричной выборки металла на рабочей поверхности одного из колец).

Экспериментальный стенд воспроизводил условия взаимодействия элементов дискового тормоза. Силовым приводом являлся асинхронный электродвигатель, обеспечивающий частоту вращения 2,0; 4,0; 6,0 об/мин. Для контроля заданных условий эксперимента было изготовлено специаль-

ное нагружающее устройство.

При проведении экспериментов одно из колец находилось в неподвижном состоянии, второе — в состоянии соосного вращения, относительно первого.

Уровень нагружения узла трения выбирался из условия обеспечения упругих деформаций шероховатого слоя взаимодействующих поверхностей и контролировался посредством пружины с заданной жесткостью. Измерение шума осуществлялось с помощью шумомера ВШВ-003-М2.

В результате проведения эксперимента оценено влияние соотношения рабочих площадей элементов трения, моделирующих тормозную колодку и тормозной диск, на интенсивность шума при их силовом взаимодействии.

Уровень шума при силовом взаимодействии кольцеобразных элементов с соотношением рабочих площадей трения 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 соотносился как 1,0 : 1,0 : 0,9 : 0,65.

При изменении скорости относительного вращения колец уровень шума достигал максимума при 4,0 об/мин и минимума — при 6,0 об/мин.

Изменение усилия прижатия колец качественно не повлияло на характер распределения уровня шума для приведенных выше соотношений рабочих площадей исследуемых элементов.

Снижение уровня шума при торможении подвижного состава дисковыми тормозами возможно за счет увеличения, конструкторскими средствами, соотношения рабочих площадей тормозной колодки и тормозного диска дискового тормоза до предельной величины равной единице.

1. Михин Н.М., Осенин Ю.И. Влияние напряженного состояния области контакта твердых тел на параметры шероховатости и волнистости поверхностей // Проблемы трения и изнашивания / Респ. межвед. науч.-техн. сб. — Киев: Техника, 1988. Вып. 34. с. 46-54.
2. Chen G.X., Zhou Z.R. Correlation of negative-velocity slope with squeal generation under reciprocation sliding conditions // Wear. — 2003. — V. 255. — P. 376-384.
3. Guangxiong C., Zhongrong Z., Kapsa P., Vincent L. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding // Wear. — 2002. — 253 — P. 411-423.

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

О.О. Щербакова, И.В. Шкалей, А.М. Мезрин

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия; shcherbakovaoo@mail.ru

Алюминиевые сплавы используются в различных областях машиностроения. Так, одной из сфер применения является их использование в качестве антифрикционных материалов для изготовления подшипников скольжения. Данное направление является весьма перспективным, поскольку такие сплавы гораздо легче и дешевле бронз, которые преимущественно используются для этих целей. Свойства алюминиевых подшипниковых материалов зависят от фазового состава. Наиболее сбалансированным комплексом свойств для работы в узлах трения обладает базовый сплав, содержащий 5%Si, 4%Cu, 6%Sn.

Целью работы было изучение влияния добавления малых количеств легкоплавких элементов (Pb, Bi, Cd, каждого до 0,5%) на трибологические свойства сплавов. При этом содержание олова в базовом сплаве было уменьшено до 4%.

Материалы и методы. В настоящей работе были исследованы два экспериментальных сплава: №1 — Al-5%Si-4%Cu-4%Sn-0,5%Pb-0,5%Bi-0,5%Cd и №2 — Al-5%Si-4%Cu-4%Sn-0,5%Pb-0,5%Bi. Для оценки эксплуатационных характеристик сплавов были проведены трибологические испытания: склерометрия и испытания на износ. Склерометрические испытания проводили на триботестере UMT-3 путем плавного внедрения с непрерывно возрастающей нагрузкой сферического индентора. Испытания на износ проводили на трибометре Т-05 по схеме «колодка-ролик» (материал ролика — Ст45) при давлениях 0,5 и 1,0 МПа. Поверхности и приповерхностные слои контактных пар изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) QUANTA 650 с рентгеноспектральным анализатором EDAX.

Результаты и их обсуждение. Результаты склерометрических испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные склерометрии

Сплав	COF	$\sigma_{\text{мкр}}$, кг/мм ²
При комнатной температуре		
№1	0,18	129
№2	0,16	125
Базовый	0,19	120
При объемной температуре 90 °С		
№1	0,17	114
№2	0,14	110

Значение напряжения микрорезания, влияющее на нагрузочную способность, у обоих сплавов сопоставимо с базовым сплавом. При повышенной объемной температуре наблюдается снижение этого параметра на ~10% по сравнению с испытаниями при комнатной температуре. Это свидетельствует о градиенте механических свойств по глубине. Также при

повышенной температуре наблюдается незначительное снижение коэффициента трения. При испытаниях на износ было установлено, что у обоих сплавов наблюдается задир при давлении 1,0 МПа. Результаты исследований показали, что сплав № 2 обладает более высокой износостойкостью.

На рис. 1 в качестве примера приведены СЭМ изображения поверхности контактной пары сплава №2 (рис. 1, а, б) и торцевого среза колодки (рис. 2, в) после трибоиспытания при 1,0 МПа.

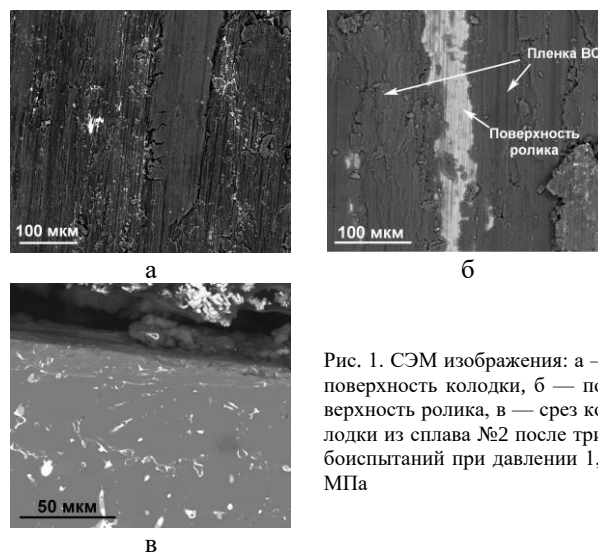


Рис. 1. СЭМ изображения: а — поверхность колодки, б — поверхность ролика, в — срез колодки из сплава №2 после трибоиспытаний при давлении 1,0 МПа

Микроскопические исследования показали, что в зоне контакта происходит процесс массопереноса. При этом на контактных поверхностях протекает комплекс механических и физико-химических процессов, при которых материал колодки переносится на стальную поверхность ролика, способствуя образованию пленки вторичных структур (ВС). С увеличением давления и температуры в зоне контакта неравномерно нанесенная пленка ВС утолщается, что приводит к развитию макрорельефа и способствует образованию задира.

Изучение срезов колодки показало, что структура сплава в приповерхностной области отличается от структуры в объеме. В этой области прослеживаются фазовые составляющие, упорядоченные в направлении трения. Это связано с тем, что в процессе трения в приповерхностных слоях происходит деформирование зерен алюминиевой матрицы, приводящее к выдавливанию легкоплавких составляющих на поверхность сплава. Этим процессом и обусловлен механизм формирования пленки ВС.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-871.2018.8.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТОДАМИ МИКРОСКОПИИ

Т.И. Муравьева, О.О. Щербакова

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия; shcherbakovaoo@mail.ru

Увеличение интенсивности движения и грузо-напряженности вызывает необходимость повышения надежности и эксплуатационной стойкости рельсов и обуславливает высокий уровень требований к ним по твердости, контактноусталостной прочности, сопротивлению образованию контактно-усталостных дефектов и хрупкому разрушению [1].

Цель работы — исследование (методами сканирующей электронной микроскопии) изменения структуры стальных рельсов в процессе эксплуатации и изучение характера роста трещин (дефектов), которые формируются в поверхностном слое рельсов, подвергнутых различным условиям эксплуатации.

Материалы и методы. В работе были исследованы образцы, изготовленные из рельсов категорий Т1 и ДТ350 общего назначения, изъятых после различных условий эксплуатации. Основные отличия — значения пропущенного тоннажа (68—880 млн. т. брутто) с момента первичной укладки до изъятия. По химическому составу сплавы данных категорий отличались наличием 0,2—0,6% Cr (по масс.) в ДТ350.

Для изучения и анализа структурно-фазовых состояний и дефектной структуры были проведены исследования на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «FEI «Quanta-650» (ускоряющее напряжение до 30 кВ) с детектором обратноотраженных электронов. Данные исследования проводили на образцах, изготовленных из поверхности головки рельсов вдоль двух направлений: по центральной оси и по выкружке.

Результаты и их обсуждение. Проведенные электронно-микроскопические исследования позволили оценить зерненную структуру сплавов и характер ее изменения при эксплуатации. На рис.1 в качестве примера показаны СЭМ-изображения структуры рельсового образца ДТ350 после минимального пропущенного тоннажа.

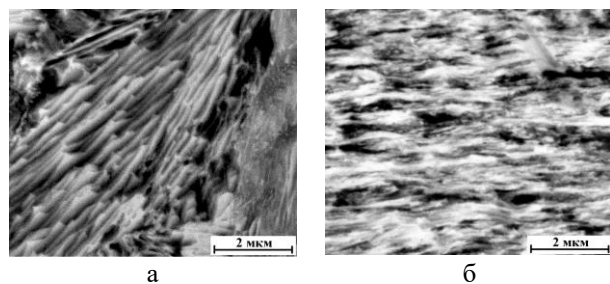


Рис. 1. СЭМ-изображение структуры рельсового образца категории ДТ350: а — по глубине; б — поверхностный слой

Исследования структуры всех образцов позволили установить, что структура стали, независимо от направления и расстояния исследуемого слоя от поверхности катания, представлена зёрнами перлита пластинчатой морфологии (рис. 1, а). После катания (даже при минимальном пропускном тоннаже) видно, что в поверхностном слое структура пластинчатого перлита носит волокнисто-деформированный характер [2].

На рис.2 представлены СЭМ-изображения образцов стальных рельсов, изготовленных из головки рельсов по выкружке, изъятых после пропуска 315 млн. т. брутто (рис. 2, а) и 880 млн. т. брутто (рис. 2, б).

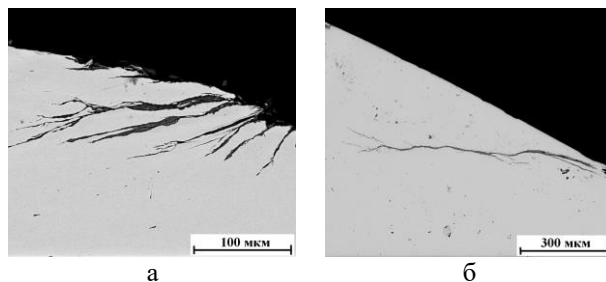


Рис. 2. СЭМ-изображения трещин на рельсовых образцах, изготовленных из поверхности головки рельсов (по выкружке) после пропущенного тоннажа: а — 315 млн. т. брутто, б — 880 млн. т. брутто

Полученные результаты по исследованию рельсовых образцов, изъятых после пропуска 68—880 млн. т. брутто, позволили оценить наклепанный дефектный поверхностный слой, содержащий выкрашивания и множественные параллельные трещины контактной усталости. Такие трещины на рабочей выкружке головки рельса, возникающие в процессе циклической пластической деформации поверхностного слоя металла, являются одной из причин развития продольных трещин. В зависимости от условий эксплуатации отличаются глубина залегания и количество продольных трещин: степень деформации и повреждения более ярко выражены при большем тоннаже.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (офи_м_РЖД 17-20-01147).

1. Громов В. Е., Волков К. В., Глезер А. М. и др. Дислокационная субструктура и внутренние поля напряжений в объемно и дифференцированно закаленных рельсах // Изв. РАН. Серия. физическая. — 2014 (78), № 10, 1230—1237.
2. Горячева И.Г., Захаров С.М., Коган А.Я. и др. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». — 2017, № 5—6, 16—26.

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А.А. Яковенко^{1*}, И.Г. Горячева¹, И.Н. Ковалева², А.Я. Григорьев²

¹Институт проблем механики РАН, Москва, Россия; anastasiya.yakovenko@phystech.edu

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

Введение. Тонкие пленки на поверхности твердых тел оказывают существенное влияние на характеристики их контактного взаимодействия и трение. Авторами [1] показано, что граничные слои растительных масел на стекле проявляют вязкоупругие свойства. В данной работе предложена модель для оценки влияния вязкоупругих свойств этих слоев на характеристики контактного взаимодействия системы сфера-плоскость.

Постановка задачи. Рассматривается внедрение с постоянной скоростью V жесткого индентора в двухслойную среду, состоящую из вязкоупругого ($i=1$), и упругого ($i=2$), слоев, сцепленных с жестким основанием (рис.1).

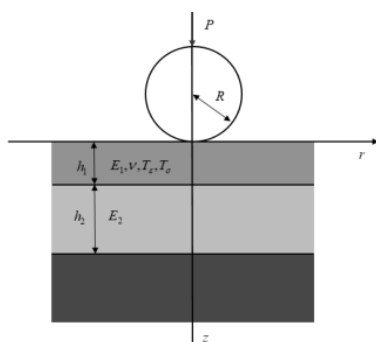


Рис. 1. Схема контактного взаимодействия

Для описания механического поведения вязкоупругого слоя используется модель Кельвина-Фойгта [2]. А для упругого слоя — модель Винклера. Форма индентора описывается функцией $f(r) = r^2 / 2R$. Перемещения по нормали к границе двухслойной среды являются суммой перемещений верхнего и нижнего слоев.

Метод решения. Контактное давление $p(r, t)$ определяется из решения дифференциального уравнения, полученного с использованием определяющих соотношений рассматриваемых механических моделей и условия контакта. Получено выражение для расчета контактного давления в произвольный момент времени:

$$\tilde{p}(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{\tilde{V} \left(\tilde{t} + \left(e^{\frac{B}{2VR} \tilde{t}} - 1 \right) \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \right) - \frac{\tilde{r}^2}{2R}}{\frac{H}{E} + (1 - \nu^2)}, \quad (1)$$

где $B = H + (1 - \nu_1^2)E / H + (1 - \nu_1^2)TE$, $T = T_\sigma / T_\varepsilon$, $H = h_2 / h_1$, $E = E_2 / E_1$, $\tilde{p} = p / E_1$, $\tilde{t} = T / T_\varepsilon$, $\tilde{r} = r / h_1$. Интегрируя функцию (1) по области контакта, получим выражение для нагрузки в произвольный момент времени, которая зависит от относительной толщины вязкоупругого и упругого слоев и скорости внедрения.

Анализ полученных результатов. На рис.2 представлены зависимости безразмерных нагрузки от времени для разных значений отношения толщин слоев: $H = 1$ (1), $H = 2$ (2) и $H = 3$ (3).

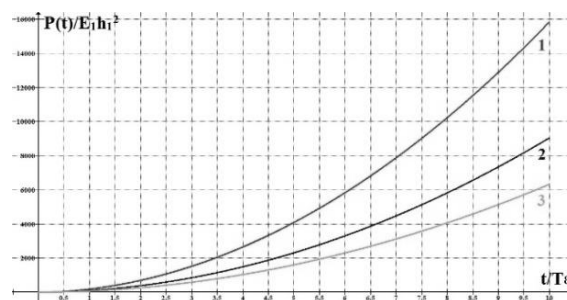


Рис. 2. График зависимости величины нагрузки от времени для разных отношений толщин слоев

Полученные данные свидетельствуют, что с увеличением относительной толщины вязкоупругого поверхностного слоя давление на подложку уменьшается при одной и той же глубине внедрения. На эту зависимость также влияет скорость внедрения и релаксационные характеристики вязкоупругого слоя.

Полученные зависимости согласуются с экспериментальными результатами [1] и могут быть использованы для определения механических свойств граничных вязкоупругих слоев при индентировании.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 18-58-00014) и Белорусского фонда фундаментальных исследований (грант БРФИ 18Р-061).

1. А.Я. Григорьев, И.Н. Ковалева // XII Междунар. науч.-техн. конф., посвященная 80-летию ИМАШ РАН: сборник трудов конференции, Москва, 19—21 ноября 2108 г. — С. 149-151
2. Горячева И. Г.: Механика фрикционного взаимодействия. — М: Наука. — 2001

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА БАЗЕ СТАЛИ 95X18 И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ, НАПЫЛЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Целью работы являлось исследование структурно-фазового состояния и триботехнических свойств псевдосплавов, полученных высокоскоростной металлизацией проволок из высокохромистых сталей и цветных металлов.

Материалы и методики исследований. В качестве объектов исследований были выбраны псевдосплавы из 95X18+АД-1 и 95X18+Л63, напыленные методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [1]. В работе проводилось исследование фазового состава, триботехнические испытания и измерение твердости, напыленных псевдосплавов.

Результаты исследований и их обсуждение. Фазовый состав и твердость газотермического покрытия из стали 95X18 и псевдосплавов на ее основе представлены в табл. 1.

Таблица 1. Фазовый состав и твердость псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации

Материал псевдосплава	Фазовый состав	Твердость, НВ 10
95X18	γ -Fe (70 об.%), α -Fe, Fe_3O_4 , FeO, ZnO	350
95X18 + АД-1	α -Fe, Al, γ -Fe (20–25 об.%), Fe_3O_4 , FeO, Al_2O_3	200
95X18 + Латунь Л63	α -Fe, γ -Fe, $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$, Cu, CuZn, Fe_3O_4	155

Интересно отметить, что в газотермическом покрытии из стали 95X18 регистрируется аномально высокое количество метастабильного аустенита, составляющее ≈ 70 об.% [2]. В тоже время, в композиционном покрытии «95X18+АД-1» обнаруживается пониженное количество аустенитной фазы, составляющее ≈ 20 –25 об.% (табл. 1). Более полное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при охлаждении стальных частиц в псевдосплавах, содержащих алюминий, связано с ускоренным охлаждением стальных частиц в покрытиях за счет быстрого отвода тепла в них из-за низкого содержания оксидных прослоек между смежными частицами, а также за счет ускоренного теплоотвода прослойками цветного металла [2]. Можно ожидать, что в железомедных покрытиях на основе высокохромистой стали 95X18 и медного сплава также будет регистрироваться пониженное содержание аустенитной фазы.

Результаты триботехнических испытаний псевдосплавов представлены на рис. 1.

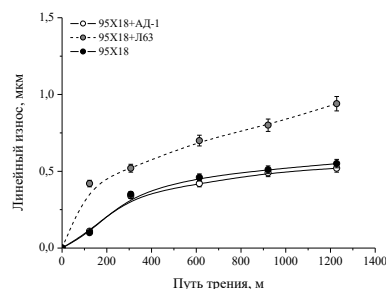


Рис. 1. Зависимости линейного износа от пути трения для газотермических покрытий и композиционных материалов различных составов, напыленных методом высокоскоростной металлизации при давлении испытаний $P=10$ МПа (смазочный материал И-20А)

Максимальной износостойкостью, из представленных псевдосплавов и газотермических покрытий, обладает псевдосплав «95X18+АД-1» (рис. 1). При этом интенсивность линейного изнашивания псевдосплава, содержащего алюминий, составляет $1,95 \cdot 10^{-10}$ (табл. 3). В тоже время, интенсивность линейного изнашивания газотермического покрытия из стали 95X18 составляет $2,15 \cdot 10^{-10}$. Таким образом, псевдосплав «95X18+АД-1» имеет износостойкость на 10% выше, по сравнению с газотермическим покрытием из стали 95X18. Повышенная износостойкость напыленного псевдосплава «95X18+АД-1» связана, по видимому, с реализацией принципа Шарпи [3] для рассматриваемого композиционного материала, а также обусловлена низким содержанием в нем оксидов железа (рис. 2). Композиционное покрытие «95X18+Л63» имеет относительно пониженную износостойкость ($I_h = 4,55 \cdot 10^{-10}$), что связано с наличием большого количества в напыленном покрытии интерметаллидных соединений на основе Cu–Zn, обладающих низкой пластичностью.

1. Витязь, П.А. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.И. Камко, А.С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2010. — №10. — С. 2–5.
2. Кукареко, В.А. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. — М., 2017. — Т.13. — №7(151). — С. 318–322.
3. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]. Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2003. — 576 с.

К ВОПРОСУ ИЗНАШИВАНИЯ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ НАНОПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

В.И. Бахшалиев, А.А. Саламов, И.А. Исмаил

Азербайджанский технический университет, г. Баку, Азербайджан; v.bakhshali@gmail.com

Математические моделирования и разработка самосмазывающихся материалов позволяют их практические применений для подшипников скольжения (ПС) поршневых машин.

Решение контактных задач теории упругости с учетом изнашивания самосмазывающихся поверхностей ПС (рис. 1) имеет важное значение для оценки и прогнозирования их долговечности [1–4]. При данной постановке задачи самосмазывающегося поверхности ПС могут работать в режиме граничного трения [5, 6]. На рис. 2 показан вкладыш ПС с эксцентрично расположенной цапфой вала, где O — центр вкладыша, O_1 — центр цапфы вала, C — центр контактной поверхности, φ — угол между центральной осью OO_1C контактной поверхности и вертикальной осью y , φ_0 — центральный угол контактной поверхности.



Рис. 1. ПС, изготовленного из самосмазывающегося материала

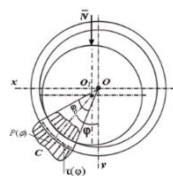


Рис. 2. Схема ПС с действующими силами

Подбор самосмазывающихся материалов для ПС имеет важное научное и практическое значения для их надежной работы [6, 7]. На рис. 3 приведены порошковый рентгендифрактометр ПС из самосмазывающихся материалов.

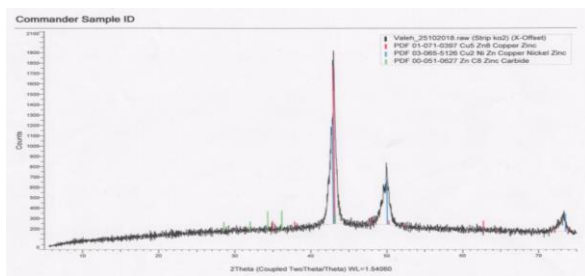


Рис. 3. Автоматический рентгендифрактометр ПС

На рис. 2 показана силы, действующие на вал: N — сила, прижимающая вал к подшипнику, $p(\varphi)$ — контактное давление вкладыша, действующее на вал, $\tau(\varphi)$ — касательные напряжения контактной поверхности. Составим условие равновесия наночастицы поверхности вкладыша, соответствующего центральному углу $d\varphi$, в следующем виде (рис. 1):

$$p(\varphi)R\cos\varphi d\varphi - f p(\varphi)R\sin\varphi d\varphi = dN, \quad (1)$$

где dN — элементарная нормальная нагрузка действующая на наночастицы, f — коэффициент трения между цапфой и вкладышем.

Выберем $Oxuz$ декартову систему координат, ось z которой направим вдоль оси вкладыша, а x и y в плоскости вкладыша. Тогда уравнение поверхности вкладыша и условие контакта тел будет так [1,5,7]:

$$F(x, y, t) = x^2 + y^2 - [R + i(\varphi, t)]^2 = 0, \quad (2)$$

$$\Delta + i + w = \delta \cos\varphi, \quad (3)$$

где $\Delta = R - R_1$ — радиальный зазор, R — начальный радиус внутренней поверхности вкладыша, R_1 — радиус цапфы вала, x и y — координаты точки этой поверхности, $i(\varphi, t)$ — линейная величина износа вкладыша, w — упругое перемещение элемента поверхности вкладыша, δ — перемещение центра цапфы вала.

В результате решения уравнений (1), (2) и (3) определены безразмерные параметры интенсивности износа поверхности вкладыша ПС.

Заключение.

Разработанная методика для оценки контактных условий трущихся поверхностей позволяет управлять процесса трения и определить оптимальное значение изнашивания и зазора в подшипниках скольжения, изготовленных из самосмазывающихся материалов.

Результаты исследований могут быть использованы при расчете и проектировании поршневых машин, применяемых в нефтяной и газовой промышленности.

1. Галахов М.А., Усов П.П. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения. М., Наука, 1990, 280 с.
2. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М., Машиностроение, 1988, 256 с.
3. Janahmadov A., Javadov M. Fractal Approach to Tribology of Elastomers, Springer Publisher, 2019, 401 p.
4. Barber J.R. Contact Mechanics, Springer International Publishing, 2018, 585p.
5. Bakhshaliev V.I. The Problem of Mathematical Simulation of Rolling Friction, J. of Friction and Wear, 2009, Vol. 30, No. 5, 2009, pp. 305–308
6. Bakhshaliev V. Mechanics of Piston Machines. Lambert Academic Publishing, Germany, 2011, 320 p.
7. Davitashvili N., Bakhshaliev V. Dynamics of Crank-Piston Mechanisms. Springer Publisher, 2016, 242 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО СПЛАВА С БОРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРОЗИОННО-ИЗНОСОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ И УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.А. Бекишева¹, Б.К. Кенжалиев², В.Г. Миронов¹, Г.Т. Шилов¹, Ж.Б. Ильмалиев¹

¹«TOO KBTU SPLAV» Казахстанско-Британский Технический Университет, г. Алматы, Казахстан, ardabekovna@mail.ru;

²АО «Институт металлургии и обогащения», г. Алматы, Казахстан

Одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения является порошковая металлургия. Новые возможности по получению изделий из порошка различного химического состава открывает создание и отработка технологии синтеза, а также формирование на поверхности деталей покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами [1].

Цель. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к покрытиям при ремонте деталей погружного нефтедобывающего оборудования, а также защитным покрытиям для оборудования, используемого в урановой промышленности, разработаны составы новых наплавочных сплавов, на основе самофлюсующегося порошкового наплавочного материала ПГ-Ж40, с включением упрочняющей добавки СгВг. Самофлюсующийся порошковый наплавочный материал на основе железа ПГ-Ж40 [2] имеет следующий химический состав, мас. %: Fe = 36–40%; C = 0.6–1.0%; Cr = 15–18%; = 3,0–5,0%; B = 2,5–4,0%; Ni = 30–35%.

В качестве упрочняющей добавки применен диборид хрома (СгВ₂), в виде ультрамикродисперсных частиц, следующего химического состава, мас. %: Ti = 0,08%; Re = 0,47%; Ni = 0,52%; B = 15%; Cr = 83,43%. Диборид хрома СгВ₂ благодаря своим свойствам — твердости и износостойкости, жаропрочности и химической инертности — достаточно востребован в технике для изготовления защитных покрытий металлов, а также в качестве компонентов и легирующих добавок твердых сплавов. Выявлены особенности фазового состава при легировании, оценено его положительное влияние на механические свойства наплавов [3].

Материалы и методы. Для экспериментальных работ были подготовлены три варианта шихты.

Первый вариант шихты представляет собой механическую смесь компонентов, в исходном состоянии подвергающуюся механическому легированию в атриторе с включением 10% упрочняющей добавки СгВг.

Второй вариант шихты включает упрочняющую добавку СгВг в количестве 20%. Третий вариант шихты включает 30% упрочняющей добавки СгВг.

Перед механическим легированием в атриторе в шихту добавили 1% стеарата цинка для предохранения от налипания шихтового материала на шары

на внутреннюю поверхность барабана и лопасти атритора. Обработку шихты в атриторе проводили на следующих технологических режимах:

- Скорость вращения мешалки — 340 об/мин;
- Диаметр шаров — 5 мм;
- Соотношения массы шихты к массе шаров —

1/18:

- Время обработки — 2 ч.

После проведения механического легирования были получены порошковые сплавы для получения покрытий методом газопорошковой наплавки (условно обозначенные 1,2,3).

Подготовка к испытанию, экспериментальных составов порошковых сплавов с боридным упрочнением для газопорошковой наплавки, производилась по ГОСТ 21448-75 «Порошки из сплавов для наплавки».

Наплавка производилась пропано-кислородной горелкой с наконечником №5, изготовленной по ТУ 200 Каз. ССР 210-84, согласно патента №1276 РК. При наплавке использовались сжатые газы: кислород по ГОСТ 5583-78 и пропан по ГОСТ 20448-80.

Стандартный образец был изготовлен из стали 45 по ГОСТ 1050-88, размером 30x45x11 (мм).

Измерения твердости показали: 1-й вариант порошкового сплава, обеспечивал твердость покрытия 40–45 НЯС; 2-й вариант 48–56 НЯС; 3-й вариант 55–58 ИКС, разница составила в среднем 10 единиц (благодаря модификации и структурным изменениям наплавленного покрытия при обработке в атриторе с боридным упрочнением). Существенное отличие в структуре металла, было установлено по границам зерен, при рассмотрении образцов металла с увеличением x1000 на электронном сканирующем микроскопе, см. рис.1

На поверхности наплавленного металла можно увидеть однородную полиэдрическую структуру с переходящей зоной из крупнозернистой в мелкозернистую. Вдоль границ зерен наблюдаются цепочки многочисленных выделений избыточных фаз двух типов — темных и реже светлых, возможно, это карбиды железа и хрома. Фазы, сформированные в основном внутри зерен и по границам зерен, на отдельных участках увеличиваются в размерах до 1 мкм, образуя блочную структуру. При исследовании микроструктур наплавленных образцов, отчетливо видна разница в структуре границ зерен. В образце, наплавленном вторым вариантом порошкового сплава, отмечена более раздробленная структура,

с меньшим количеством крупных однородных образований.

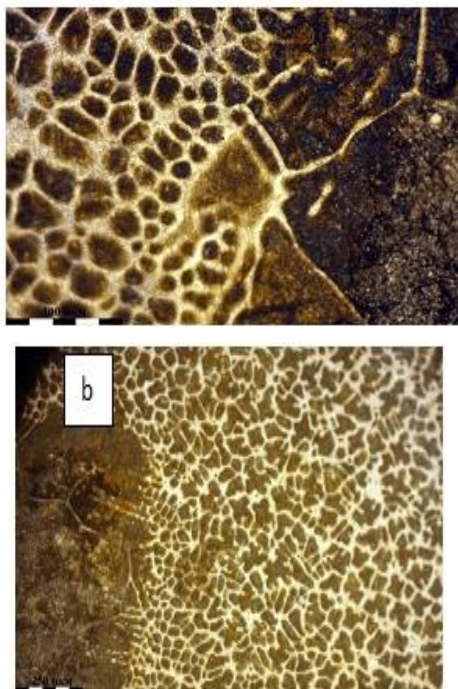


Рис. 1. Структура коррозионно-износостойкого газотермического покрытия. а — микроструктура покрытия с 0.5% содержанием микрочастиц $\text{CrB}_2 \times 200$; б — наноструктура покрытия с 0.5% содержанием наночастиц $\text{CrB}_2 \times 1000$

Площадь растекания металла при газопорошковой наплавке, определялась по специальной методике на образцах листового материала, из ст.3, толщиной 1,5 мм. Полученные результаты, по химическому составу, твердости наплавленного покрытия и площади растекания расплава, приведены в табл. 1.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что критериями оптимальности технологического режима механического легирования, при разработке композиционных наплавочных материалов с боридным упрочнением (CrB_t), является качество наплавленного материала, с учетом сплошности нанесенного покрытия, твердости и растекаемости наплавленного материала. Установлено, что допускаемое введение ультрамикродисперсных упрочняющих частиц CrB_t в сплав ПГ-Ж40 не должно превышать 10%, в процессе механического легирования.

Представленный порошковый наплавочный сплав ПГ-Ж40 (АО «КБТУ») с боридным упрочнением имеет хорошую растекаемость по поверхности детали. В наплавленном слое отсутствуют поры, не проплавления и шлаковые включения. Наплавленная поверхность имеет волнистость в пределах 0,1—0,5 мм на длине 40-50мм.

Проведённые испытания показали, что сплав ПГ-Ж40, с добавкой ультрамикродисперсных частиц диборида хрома CrB_2 , обеспечивает необходимые коррозионно-износостойкие свойства покрытий, применяемых при ремонте оборудования нефтегазовой и урановой промышленности для продления их межремонтного ресурса.

1. A.A. Lukianov, Yu.A. Sokolov «Mechanical Properties by sib technology», журнал «Научно-технические ведомости СПбПУ»
2. Патент РК № 27499 от 09.2012 г. АО «КБТУ»
3. Н. Б. Фомичева, Л. М. Нечаев, Е. В. Маркова Особенности влияния кремния на структуру наплавочных материалов, журнале "Черные металлы», 2017, №12, стр.45-49

Таблица 1. Состав, твердость и растекаемость наплавленных покрытий порошковыми сплавами, полученными механическим легированием, с добавкой CrB_t

Варианты состава сплава с добавкой CrB2	Материал	Состав основных химических элементов, мас. %							Твер- дость, НВ	Площадь растекания сплава, мм ²
		Fe	Ni	Cr	Co	Cu	V	Nb		
1вариан, добавка 10% CrB2	Напла- вочный порош- ковый сплав	27,43/ 26,51	38,57/ 40,81	25,45/ 25,06	0,27/ 0,19	3,38/ 3,68	3,35	0,56/ 0,55	454	1376
		50,55	28,01	15,29	0,22	2,98	2,57	0,38		
2вариан, добавка 20% CrB:		25,94/ 24,36	35,38/ 33,83	31,38/ 34,78	0,31/ 0,28	3,52/ 3,29	3,02	0,50/ 0,48	516	1125
		37,26	33,58	21,55	—	3,55	3,61	0,46		
3вариан, добавка 30% CrB2		24,0/ 23,33	31,89/ 30,5	37,18/ 39,69	0,31/ 0,35	3,15/ 3,07	2,84	0,04/ 0,45	587	974
		46,24	27,66	20,18	—	2,86	2,68	0,38		

ПОЛУЧЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

В.П. Бирюков¹, Э.Г. Гудушаури¹, Т.А. Базлова²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; laser-52@yandex.ru

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Изготовление изделий из меди и ее сплавов дорого, с экономической точки зрения и для уменьшения расхода медных сплавов изделия можно создавать путем наплавки медных сплавов на сталь [1]. Целями работы является определение влияния поперечных колебаний лазерного луча на перемешивание наплавляемой шихты с материалом основы и на производительность наплавки.

Материалы и методы исследования. В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН [2]. Образцы изготавливали из стали 40Х размерами 15×20×70 мм. Для наплавки выбран порошок на основе меди ПР-БрАМц 9-2 с размером частиц 40–150 мкм. В качестве варьируемых параметров были выбраны мощность излучения $P = 700–1000$ Вт, скорость обработки $V = 5–10$ мм/с и диаметр пучка $d = 1–3$ мм. В качестве дополнительного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой $f = 220$ Гц. Использовался сканатор резонансного типа с упругим элементом, на котором было закреплено зеркало. Металлографические исследования наплавленных покрытий проводили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографическом микроскопе Альтами MET 1С и цифровом микроскопе АМ413МL.

Структура и химический состав наплавленных слоев исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов.

Для определения трибологических характеристик наплавленных образцов применялась универсальная машина трения МТУ-01. Испытания проводили по схеме «плоскость (наплавленный образец) — кольцо сталь 40Х (48–52 HRC). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1–1,1 м/с и 1–3 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали масло трансмиссионное ТСЗп-8.

Результаты экспериментов и их обсуждение.

На рис. 1(а и б) представлены микрошлифы наплавленных дорожек с размерами 0,75×2,1 мм, твердостью (181–208 HV), и 0,68×3,38 мм — (204–224 HV), полученных расфокусированным лучом и сканирующим с частотой 220 Гц лучом соответственно. Зона проплавления основы при обработке расфокусированным лучом и сканирующим лучом составила 380 и 150 мкм соответственно. Площадь поперечного сечения единичного наплавленного слоя при сканировании луча в 1,5 раза больше, чем

при наплавке расфокусированным лучом.

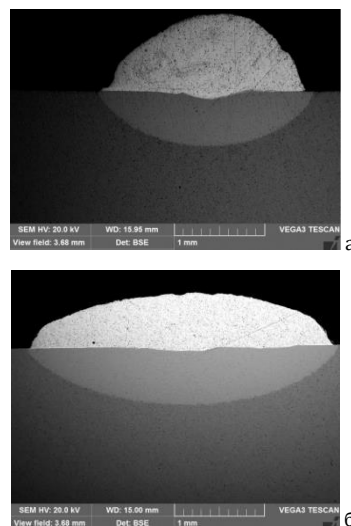


Рис. 1. Наплавка бронзы на сталь ×75: а — расфокусированным лучом, б — сканирующим лучом.

Из проведенных исследований следует, что при обработке расфокусированным лучом в наплавленном слое наблюдается содержание железа 12%, а при обработке с поперечными колебаниями луча 4%, что является следствием более глубокого проплавления основы. Коэффициенты трения изменялись в пределах 0,016–0,022 и 0,014–0,021 при испытании образцов, наплавленных расфокусированным и сканирующим лучом соответственно, что в два раза ниже, чем на образцах из литой бронзы.

Лазерная наплавка антифрикционных покрытий на стальные поверхности может быть использована в судовом машиностроении, узлах трения гидравлических агрегатов, в тяжело нагруженных подшипниках скольжения и быстроходных механизмах. Прочность сцепления нанесенных лазерным лучом покрытий на основе меди выше прочности на сдвиг нормализованной и улучшенной стали и составляет 350–480 МПа.

1. Рыбин В.В., Вайнерман А.Е., Баранов А.В., Андронов Е.В., Пичужкин С.А. Исследование особенностей и разработка прогрессивных технологий сварки медных сплавов со сталями и наплавки медных сплавов на стали // Вопросы материаловедения. — 2006 № 1 (45), 220–229.
2. 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.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА РАЗМЕРЫ УПРОЧНЕННЫХ ЗОН

В.П. Бирюков¹, В.В. Исаков², А.Ю. Федотов², Д.А. Баулин²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, laser-52@yandex.ru

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

Целями работы были определение влияния дефокусировки луча волоконного лазера на глубину и ширину зон лазерного упрочнения, и проведение полного факторного эксперимента на линейных участках.

Материалы и методы исследования. Лазерное термоупрочнение образцов стали 40Х с размерами 12×20×70 мм выполняли с помощью лазерного комплекса на основе волоконного лазера LC10, оснащенного оптической головкой FLWD50L закрепленной на подвижном фланце руки робота KR120HA. Диаметр транспортного волокна 200 мкм, фокус коллимирующей линзы 160 мм, фокусирующей линзы 500 мм. Обработку выполняли при мощности излучения лазера 3000 и 4000 Вт, скорости перемещения луча 30 и 40 мм/с, дефокусировке луча в пределах 25 — 200 мм. Металлографические исследования проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, цифровой микроскоп АМ413ML, металлографический микроскоп Альтами МЕТ 1С.

Во второй серии опытов с помощью метода полного факторного эксперимента (ПФЭ) определяли влияние режимов обработки на параметры упрочненных дорожек. В качестве факторов эксперимента были выбраны мощность излучения Р, Вт, скорость обработки V, мм/с, и дефокусировка луча L, мм. Для построения математических моделей в качестве откликов системы рассматривались глубина H и ширина B зон лазерной закалки.

Результаты экспериментов и их обсуждение. По результатам металлографических исследований упрочненных зон в первой серии экспериментов построены графики зависимости глубины и ширины зон закалки от изменения расстояния до фокальной плоскости L при погонной энергии луча 100 Дж/мм на рис. 1 (а, б). При дефокусировке луча менее 50 мм наблюдается кинжальное проплавление материала основы. Глубина и ширина зоны закалки изменяется линейно в интервале 100—150 мм и поэтому этот участок можно описать уравнениями регрессии первого порядка [1].

По уравнениям регрессии проведены расчеты, и сопоставлены с результатами эксперимента. Расчетные значения отличаются от фактических значений глубины и ширины зон закалки не более чем на 5%. Превалирующее влияние на геометрические параметры зон закалки имеет мощность излучения. С ее увеличением растут ширина и глубина зоны за-

калки. С ростом скорости перемещения глубина и ширина закаленных зон уменьшается при L = 150. Однако при L = 100 мм при меньших значениях скорости ширина падает, что связано с расходом энергии на плавление некоторого объема поверхности материала образца. С увеличением дефокусировки (диаметра) луча глубина зон закалки уменьшается, а ширина возрастает. Микротвердость зон лазерной закалки изменялась в пределах 7180—8300 МПа в исследуемом диапазоне. Обработка при равной погонной энергии излучения 100 Дж/мм дает близкие по микротвердости и геометрическим параметрам зоны лазерной закалки. Глубина зон упрочнения изменялась от 0,8 до 1,2 мм, а ширина зон от 5,8 до 7,6 мм. Методика определения параметров упрочненных зон [2] может быть использована для всех типов лазеров: газовых, многолучевых, диодных, дисковых и волоконных. Для ее реализации необходимо обработать всего 7 образцов наличие металлографического оборудования и табличный редактор MsExcel персонального компьютера.

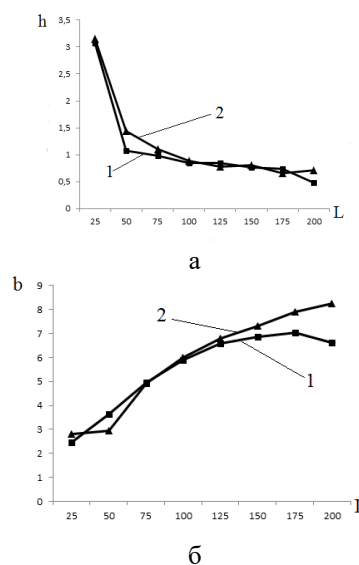


Рис.1. Зависимость глубины (а) и ширины (б) зон закалки от расфокусировки лазерного луча: 1 — Р = 3000 Вт, V = 30 мм/с, 2 — Р = 4000 Вт, V = 40 мм/с.

- Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. — М: Наука. — 1980
- Бирюков В.П. Расчетно-экспериментальное определение параметров упрочненных зон при лазерной закалке чугунов и сталей // ФОТОНИКА. — 2017, №2, 22—32.

ВЛИЯНИЕ КАРБИДНОГО СПЛАВА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИАМИДА ФЕНИЛОНА С-2

А.И. Буря¹, А.-М.В. Томина¹, Е.Э. Литвинова¹, В.М. Гавриш²

¹Днепропетровский государственный технический университет, Каменское, Украина; ol.burya@gmail.com

²Научно-образовательный центр «Перспективные материалы и технологии», 5brachman5@gmail.com

Введение

В процессе эксплуатации большинство аварий и нарушений (80–85%) в нормальной работе оборудования, связанное с износом деталей машин и механизмов [1]. Поэтому, одной из важных задач триботехнического материаловедения является разработка износостойких полимерных композиционных материалов. Перспективным путем повышения износостойкости полимерной матрицы является использование дисперсного наполнителя, который увеличивает твердость, прочность и термостойкость полимерной матрицы, при одновременном снижении технологической усадки и повышении стабильности размерности изделий [2].

Материалы и методы исследований

Учитывая вышесказанное, нами были разработаны композиты на основе ароматического полиамида фенилон марки С-2, наполненного 0,5–5 мас.% титано-вольфра-мо-кобальтовым (ТК) сплавом WC84TiC4Co12.

Приготовление композиций совершали методом сухого смешивания во вращательном электромагнитном поле с последующей переработкой композиционным прессованием.

Триботехнические характеристики изучали в условиях трения без смазки на дисковой машине трения при давлении 0,6 МПа, скорости скольжения 1 м/с. Путь трения составлял 1000 м. Образцы изготавливались цилиндрической формы $\varnothing = 10$, $h = 10$ мм; в качестве контртела использовали сталь 45 (45–48 HRC, $R_a = 0,16–0,32$ мкм).

Результаты и их обсуждение

Из табл.1 видно, что введение карбидного сплава в композиции позволяет повысить износостойкость исходного полимера в 1,3–1,9 раза, что можно объяснить возрастанием микротвердости полимерной матрицы на 15–28% (рис. 1) за счет упорядочения надмолекулярной структуры связующего.

мера, в результате чего наблюдается уменьшение твердости матрицы [3], при введении наполнителя наблюдается иная ситуация, происходит ее повышение, объясняемое деформационным упрочнением разработанных композиций, поскольку известно [4] что карбиды, создают в полимерной матрице наиболее сильные торможение дислокаций, возникающих под действием внешних нагрузок.

Что касается коэффициента трения, его повышение на 13% обусловлено тем, что в условиях трения без смазки наблюдается повышение адгезионной составляющей трения между наполнителем и металлическим контртелом [5].

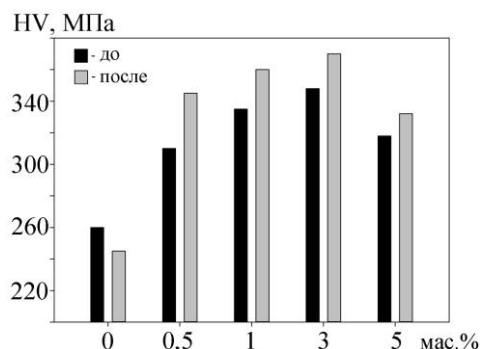


Рис. 1. Микротвердость матрицы до и после трения

Анализ результатов разработанных композитов дает основание заключить, что оптимальным комплексом трибологических свойств обладает композит, содержащий 3 мас.% ТК, при его дальнейшем увеличении до 5 мас.% происходит ухудшение эксплуатационных характеристик, связанное с возрастанием агломерации частиц сплава, при образовании которых матрица не может пропитать наполнитель, в результате чего частицы ТК сплава удаляются с поверхности трения, что ведет к повышению дефективности материала.

Таблица 1. Трибологические свойства композитов

С, мас. %	Интенсивность линейного износа, $I_n \times 10^{-8}$	Коэффициент трения, f
0	3,91	0,52
0,5	3	0,55
1	2,65	0,59
3	2,05	0,57
5	2,9	0,54

При трении, под действием многократных деформаций, происходит утомление исходного поли-

1. В.Е. Юдин Полимерные композиционные материалы: разработка, свойства и перспективы применения [Электронный ресурс]: В.Е. Юдин. — Режим доступа: <http://kargin.msu.ru/files/yudin.pdf>
2. Карпинос Д.М., Олейник В.И. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике. — К.: Наук. Думка. — 1981. — 180 с.
3. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. — М.: Химия. — 1978. — 328 с.
4. Сафин, В.Н. Композиционные материалы: текст лекций. — Ч.: Издательский центр ЮУрГУ. — 2010. — 36 с.
5. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. — М.: Наука. — 1977. — 138 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРЕ ТРЕНИЯ
РОЛИК-КОЛОДКА НА МАШИНАХ ТРЕНИЯ ТИПА «АМСЛЕР»

Г.В. Даровской, А.М. Елманов, М.Н. Езупова

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

Вопросам тепловых процессов, протекающих при трении, посвящено большое количество научных публикаций. Однако, применительно к схеме трения «ролик—колодка», которая применяется при моделировании на машинах трения типа «Амслер» (ИИ 5018, 2070 СМТ-1 и др.), таких публикаций крайне мало. Это потребовало дополнительных исследований тепловых процессов на роликовых машинах трения.

Рассмотрим распределение тепловых потоков в паре трения «ролик-колодка» (рис. 1).

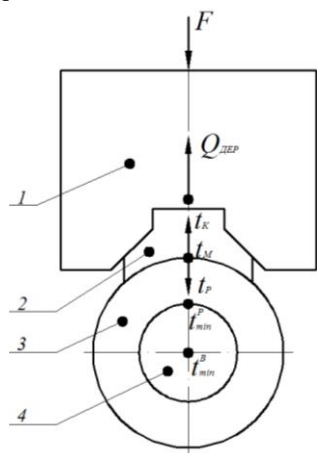


Рис. 1 Структурная схема распределения тепловых потоков в модели «ролик—колодка»: 1 — держатель (сталь 45), 2 — колодка (бронза БрАЖ 9-4); 3 — ролик (сталь 45); 4 — вал (сталь 45)

Система уравнений теплового баланса конструкции, изображенной на рис. 1 можно представить в виде

$$\begin{cases} Q_{ДЕР} + \alpha_K \cdot S_{КОЛ} \cdot (t_K - t_{OC}) = A \cdot f \cdot F \cdot V, \\ Q_{ДЕР} + \frac{t_M - t_{MIN}^K}{R_K(\lambda)} = A \cdot f \cdot F \cdot V, \\ t_{MIN}^K = 2t_K - t_M, \\ \frac{t_M - t_{MIN}^P}{R_P(\lambda)} + \alpha_P \cdot S_{Полосы} \cdot (t_P - t_{OC}) + \alpha_M \cdot S_{Полосы} \cdot (t_M - t_{OC}) = (1 - A) \cdot f \cdot F \cdot V, \\ t_{MIN}^P = 2t_P - t_M, \\ t_{MIN}^B = 2t_B - t_{MIN}^P, \\ \frac{t_{MIN}^P - t_{MIN}^B}{R_B(\lambda)} = \alpha_B \cdot \left(\frac{t_B - t_{OC}}{2} \right) \cdot S_B \end{cases}$$

где α_K — коэффициент теплоотдачи с поверхности колодки, Вт/м²·°C; $S_{КОЛ}$ — площадь поверхности теплоотдачи колодки, м²; t_K — температура колодки, °C; t_{OC} — температура окружающей среды, °C; A — коэффициент разделения тепловых потоков, отводимых из зоны контакта; f — коэффициент тре-

ния; F — внешняя нагрузка на колодку, Н; V — скорость скольжения ролика относительно колодки, м/с; $R_K(\lambda)$ — термическое сопротивление теплопроводности колодки, °C/Вт; $R_B(\lambda)$ — термическое сопротивление теплопроводности вала, °C/Вт; t_B — температура вала, °C; t_M — температура масла (температура в контакте), °C; t_P — температура ролика, °C; $R_P(\lambda)$ — термическое сопротивление теплопроводности ролика, °C /Вт; t_{MIN} — минимальная температура в центре контактирующей поверхности; $Q_{ДЕР}$ — тепловая мощность, отводимая из контакта через держатель, Вт; $t_{ДЕР}^{MIN}$ — температура в центре держателя, °C; $R_{ДЕР}(\lambda)$ — термическое сопротивление теплопроводности держателя, °C /Вт.

Система уравнений, описывающая тепловой процесс в паре трения «ролик—колодка», содержит семь уравнений и восемь неизвестных величин, подлежащих определению и записана для средних значений температур трущихся поверхностей. Полагая, что минимальное значение температуры есть ее значение в центре сопрягаемого элемента схемы.

Решая систему уравнений теплового баланса, определим неизвестные температуры колодки t_K , ролика t_P (табл. 1). Экспериментальная температура в контакте определялась на модернизированной машине трения ИИ 5018 [1] с помощью термопары.

Таблица 1. Значения коэффициента трения и температуры в контакте для колодки эллиптического типа с радиальным зазором $\Delta=22,60326$ мкм при скорости скольжения 2м/с

Нагрузка F , Н	Коэффициент трения, f	Теоретическая температура колодки, t_K , °C	Теоретическая температура ролика, t_P , °C	Экспериментальная температура, t_{Σ} , °C
115,15	0,012	36	36	41
230,3	0,012	48	47	51
345,45	0,013	63	61	64
460,6	0,009	77	74	67
575,75	0,01	75	72	84
690,9	0,012	97	93	96
806,05	0,01	109	108	104
1036,35	0,037	364	346	318

Расхождение между теоретической и экспериментальной температурой не превышает 12%.

1. Г.В. Даровской, М.А. Буракова, В.Н. Поляков, В.Н. Кротов. Исследование фрикционных свойств высокотяговых масел. Ростов н/Д.: РГУПС, 2017. 88 с.

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ ГРАФЕНОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА НА ПРОЦЕСС МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

А.И. Комаров¹, П.С. Золотая¹, Н.И. Горбачук², Н.Н. Рожкова³, В.П. Новиков⁴

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, polina.zolotaya@gmail.com

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

³Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, Россия

⁴ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск

Перспективным направлением повышения эксплуатационных свойств оксидокерамических покрытий, формируемых на сплавах алюминия микродуговым оксидированием (МДО), является их модифицирование в процессе получения углеродными наноматериалами (УНМ). Графен, благодаря своей уникальности, в частности, полупроводниковым свойствам с аномально высокой подвижностью носителей тока, представляет значительный интерес в качестве такого модификатора. На сегодняшний день выполнен ряд исследований по влиянию добавок дисперсных частиц графита на характеристики покрытий, получаемых методом МДО. При этом лишь в незначительной их части делается попытка объяснения механизма воздействия таких частиц на процесс МДО.

Целью настоящего исследования является разработка модельных представлений, объясняющих характер воздействий частиц графена на процесс МДО.

Материалы и методы. Микродуговое оксидирование проводилось в анодно-катодном режиме в силикатно-щелочном электролите. В качестве графеноподобного углерода (ГУ) исследовалось два типа добавки: ГУ, полученный низкотемпературной интеркаляцией графита в растворе жидкого аммиака [1], и природная форма — подготовленный по [2] шунгитовый наноуглерод (ШУ). Структурным элементом исследуемых добавок является графен.

Результаты и их обсуждение. Модель микродугового оксидирования с введением графена в процесс основана на положениях теории протекания и описывает увеличение эффективности процесса за счет снижения порога зажигания микроразряда в связи с введением графеновых частиц в электролит [3].

Процесс оксидирования развивается в принципиально гетерогенной системе, включающей частицы углеродных наноматериалов, обладающие электронной, а не ионной проводимостью. При этом эффективная электропроводность частиц наноматериалов существенно больше эффективной электропроводности электролита.

В случае гомогенной (однородной), изотропной среды векторы плотности электрического тока $\mathbf{j}$ и напряженности электрического поля $\mathbf{E}$, связаны друг с другом выражением:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (1)$$

В нерегулярных (неупорядоченных) гетероген-

ных системах векторы плотности электрического тока $\mathbf{j}$ и напряженности электрического поля $\mathbf{E}$, а также тензоры удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости являются случайными функциями радиус-вектора $\mathbf{r}$.

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Согласно теории протекания, проводимость таких систем зависит от концентрации фазы с большей электропроводностью по степенному закону. Эффективная электропроводность $\sigma_{\text{эфф}}$ гетерогенных систем определяется электропроводностью компонентов и их объемным содержанием.

Таким образом, присутствие углеродных наночастиц в электролите приводит к неоднородности распределения электрического потенциала и стимулирует развитие микроразрядов при меньшей разнице потенциалов, а также усугубляет неоднородность плотности тока в системе. Все это приводит к увеличению локальной (в местах разряда) температуры и к повышению эффективности процесса оксидирования.

В подтверждение модельных представлений было проведено введение добавок ШУ и ГУ в базовый электролит для оксидирования сплава Д16. Установлено, что добавки приводят к уменьшению объема и количества пор в получаемых покрытиях, к росту толщины покрытий в 1,5-2 раза (рис.1). При этом обеспечивается повышение микротвердости в 1,2-1,3 раза за счет роста содержания высокотемпературной формы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и снижение граничного трения в 1,5-2 раза.

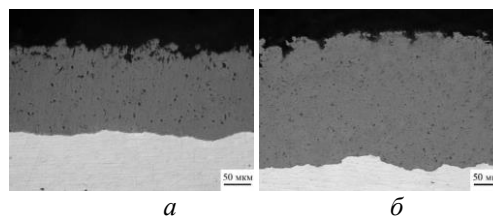


Рис. 1. Микроструктура на сплаве Д16, полученного в базовом электролите (а) и модифицированном графеновым наноуглеродом (б)

- Новиков В.П., Кирик С.А. Низкотемпературный способ получения графена // Письма в ЖТФ. — 2011 (37), № 12, 44–49
- Рожкова, Н.Н. Наноуглерод шунгитов — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. — 2011
- Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников / М.: Наука. — 1979

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЕРМИКУЛИТОМ

Н.Н. Лазарева¹, Д.Ю. Кириллина¹, С.А. Слепцова¹, Е.С. Афанасьева¹, А.А. Охлопкова^{1,2}

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия; lazareva-nadia92@mail.ru

²Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

Введение. Климатические условия северных регионов — продолжительное воздействие экстремально низких температур и температурных перепадов с большой амплитудой, оказывают существенное влияние на эффективность эксплуатации и надежность техники. Одним из наиболее распространенных материалов, применяемых в ответственных узлах трения техники, является политетрафторэтилен (ПТФЭ). ПТФЭ привлекает к себе внимание прежде всего благодаря самому низкому коэффициенту трения из всех известных полимеров. Ценными свойствами материалов на основе ПТФЭ являются работоспособность в широком диапазоне температур и химическая инертность [1].

Исходя из функционального назначения и условий эксплуатации к материалам для деталей узлов трения предъявляются такие требования: высокая износостойкость при сохранении деформационно-прочностных свойств, инертность и т.д. Такие свойства достигаются при введении различных наполнителей. Наполнители должны обладать высокой термической и химической стойкостью, доступностью, хорошей диспергируемостью. Этим и обусловлен повышенный интерес к слоистым силикатам для создания полимерных композитов.

Цель работы: исследование совместного влияния вермикулита и ФОРУМА® на свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ).

Материалы и методы исследования. В работе полимерной матрицей выступил ПТФЭ, а в качестве наполнителя был использован механоактивированный вермикулит Инаглинского месторождения РС(Я) (минеральный состав — доломит 11%, флогопит 88%), а также ФОРУМ® (ООО «Владфорум», Россия) в качестве функциональной добавки.

Технология изготовления образцов композитов основана на стандартной методике переработки ПТФЭ — ГОСТ 10007-80.

Физико-механические свойства определяли по ГОСТ 11262-80 на испытательной машине «Shimadzu AGS-J» (Япония) при комнатной температуре и скорости перемещения подвижных захватов 100 мм/мин. Триботехнические свойства определяли на универсальном высокотемпературном трибометре «CETR UMT-3» (США) по схеме трения «палец—диск» при нагрузке 160 Н и скорости скольжения 96 об/мин в течение 4 ч с приработкой в 1,5 ч.

Результаты и их обсуждение. Результаты физико-механических и триботехнических испытаний

приведены в табл. 1 и рис. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики ПКМ

Композит	ϵ_{pp} , %		σ_{pm} , МПа		E, МПа	
	+1%Ф	+2%Ф	+1%Ф	+2%Ф	+1%Ф	+2%Ф
ПТФЭ	320		20		479	
ПТФЭ+1%B	232	301	18	16	452	482
ПТФЭ+2%B	272	269	17	14	537	558
ПТФЭ+5%B	274	279	15	18	482	452
ПТФЭ+7%B	284	313	14	17	477	583

Примечание. ϵ_{pp} — относительное удлинение при разрыве; σ_{pm} — предел прочности при растяжении; E — модуль упругости, B — вермикулит, Ф — ФОРУМ®.

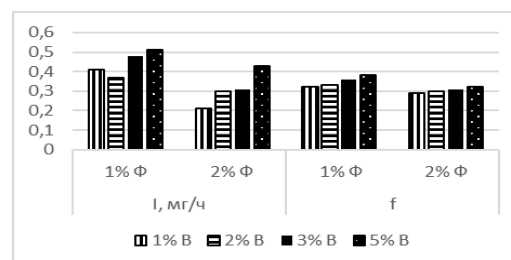


Рис. 1. Скорость массового изнашивания и коэффициент трения ПКМ. I(ПТФЭ)=125 мг/ч, f(ПТФЭ)=0,20

Из рис. 1 видно, что введение наполнителей в ПТФЭ привело к улучшению триботехнических свойств композитов. Так при сравнении свойств, полученных у композитов с различным содержанием ФОРУМА® видно, что композиты, содержащие 2 мас.% ФОРУМА® характеризуются более низкими показателями коэффициента трения и скорости массового изнашивания. При этом физико-механические характеристики (табл. 1) всех композитов незначительно снижаются по сравнению с исходным ПТФЭ.

Заключение. Таким образом, из анализа результатов физико-механических и триботехнических испытаний композитов показано, что вермикулит и ФОРУМ® являются перспективными наполнителями для улучшения эксплуатационно-значимых показателей композитов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке МНИВО РФ НИР №FSRG-2017-0021, FSRG-2017-0017.

- Охлопкова А. А., Адрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. — Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН. — 2003.

АНТИКОРРОЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИНОВОЛАКЭФИРНОГО ПЛЕНКООБРАЗОВАТЕЛЯ И СТЕКЛЯННЫХ ЧЕШУЕК

Л.В. Левиев, Н.Р. Прокопчук

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь; prok_nr@mail.by

Современные высокоэффективные антикоррозионные покрытия создаются нанесением на металлические поверхности многокомпонентных систем. Важнейшими компонентами таких композиционных материалов являются: химически стойкое связующее и наполнитель пластинчатой формы, создающий барьер для проникновения агрессивной среды через защитную пленку к металлу [1].

Ранее нами обоснован выбор [2, 3] эпоксисиноволакиноэфирной смолы и стеклянных чешуек для получения агрессивностойких покрытий.

Целью данной работы являлось установление влияния размера и содержания стеклянных чешуек, введенных в эпоксисиноволакиноэфирную матрицу, на реологию и отверждение композиций, сетчатую структуру, физико-механические и защитные свойства покрытий по стали.

Для получения защитных покрытий использовалась двухупаковочная система: эпоксисиноволакиноэфирная смола производства компании «ASHWAND»; отвердитель компании «Akzo Nobel» — 90%-ный раствор гидропероксида кумола в ароматическом растворителе; стеклянные чешуйки толщиной от 80 нм до 9,0 мкм. вводились в композиции в количествах 5—30 мас.%. Пленкообразователь и отвердитель смешивались в соотношении 98:2 мас. частей на лабораторном диссольвере WD-200S. Твердость покрытий оценивалась с помощью твердомера Баркола по BS 2782 часть 10: метод 1001. Эластичность композитных пленок определялась трехточечным методом по BS 2782 часть 10: метод 1005.

Стойкость к статическому воздействию жидкостей определялась по ГОСТ 9.403-80. Образцами для испытаний являлись окрашенные пластины из листовой стали марки 08кп по ГОСТ 16523-97, размером 70×150 мм и толщиной 0,5—1,0 мм, толщина лакокрасочного покрытия 500±5 мкм.

Установлено, что с уменьшением размера чешуек с 5,5—9,0 мкм до 0,08—0,12 мкм наблюдается более резкий рост динамической вязкости композиций при увеличении содержания стеклянных чешуек, особенно свыше 20% мас. Такое повышение тиксотропных свойств можно объяснить снижением молекулярной подвижности из-за усиления взаимодействия между функциональными центрами макромолекул смолы и стеклянных чешуек. Показано, что увеличение дисперсности частиц чешуек и их содержания в композициях повышает скорость отверждения покрытий. Минимальная температура формирования покрытия +5°C, для полного его отверждения

требуется температура выше +15 °C. Жизнеспособность композиций до 40 °C не ниже 35—40 минут, что позволяет получать покрытия с помощью кисти, валика, безвоздушным распылением.

Показано, что независимо от толщины чешуек, на зависимости прочности при сжатии от их содержания наблюдается максимум в области 10—20 мас.%. Снижение прочности композиций при превышении чешуек свыше 20 мас.% обусловлена нарушением сплошности матрицы из-за недостатка связующего. Выявлено, что при одном и том же содержании наполнителя 15 мас.% в композитах, наибольшая их прочность достигается в случае наполнения чешуйками с их толщиной в диапазоне 750 нм—3,5 мкм. Твердость покрытий по Барколу с наполнением в начале возрастает от 43 усл. ед. до 60 усл. ед., однако при превышении этого содержания наполнителя снижается до 50—53 усл. ед. из-за разрыхления матрицы. С ростом толщины чешуек твердость незначительно возрастает, что можно объяснить уменьшением глубины проникновения индентора вследствие слоистого их расположения. С увеличением содержания и толщины чешуек эластичность незначительно снижается, т.к. крупные частицы в большем количестве разрывают полимерную матрицу при деформации на изгиб.

Установлено, что максимум значений гелефракции, коэффициента сшивания олигомерных молекул пленкообразователя, прочности покрытий на сжатие, стойкости в агрессивных средах приходится на содержание стеклянных чешуек 15 мас.%.

Выявлено, что максимальные защитные свойства покрытий по стали достигаются при трехслойном перекрывании поверхности с толщиной каждого слоя 500 мкм.

Доказана возможность эффективной защиты от коррозии стальных поверхностей в средах кислот, растворов солей, нефтепродуктов в диапазоне температур от 20 до 90 °C. Разработанные покрытия перспективны для защиты емкостей, трубопроводов, металлических конструкций на химических предприятиях.

1. Брок Т., Гротэклаус М., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. М.: ООО «Пейнт-Медиа», 2007. 548 с.
2. Прокопчук Н.Р., Левиев Л.В. Антикоррозионные полимерные химстойкие покрытия на основе эпоксидных олигомеров (Обзор)// Материалы, технологии, инструменты. 2015. Т.20 №1. С.43-49
3. Левиев Л.В., Прокопчук Н.Р. Антикоррозионные покрытия повышенной химстойкости// Труды БГТУ. 2015. №4. С.134-138

МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

В.В. Макеев

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; makeyeu@bsut.by

Одним из наиболее перспективных направлений использования модифицированной древесины является создание на ее основе антифрикционного материала для применения в узлах трения машин и механизмов. Из практики известно, что модифицированная древесина, прессованная и пропитанная смазочным материалом (СМ), хорошо работает во влажных и некоторых агрессивных средах, а также в узлах трения, где возможно присутствие абразивных частиц (транспортёры для подачи песка, комбикормов и других сыпучих или загрязненных сред, сельскохозяйственные и строительные механизмы).

Поверхности деталей трибосопряжения, подвергавшихся воздействию абразивных частиц в процессе эксплуатации, имеют множество царапин — следов трения. Их количество и глубина определяют абразивную износостойкость, которая зависит от ряда факторов и, в первую очередь, от микроструктуры материалов.

В настоящей работе ставилась **цель** исследовать механизм и характеристики абразивного изнашивания антифрикционного материала на основе модифицированной древесины березы для обоснования возможности ее применения в качестве вкладышей самосмазывающихся подшипников скольжения при эксплуатации в абразивной среде.

Материалы и методы. Для проведения исследований выбраны образцы трех типов: I — образцы натуральной древесины березы при влажности $W = 12 \pm 1\%$ прямоугольной формы толщиной вдоль волокон 7 мм; II — прессованные образцы древесины березы с линейно изменяющейся плотностью вдоль волокон от 800 кг/м^3 до 1200 кг/м^3 в виде сегмента цилиндрической оболочки толщиной вдоль волокон равной 7 мм; III — образцы типа II, пропитанные СМ на основе минерального масла в термоконтрастной среде. Степень наполнения СМ $i = 90\%$ от общего объема капиллярно-сосудистой системы образца древесины березы при влажности $W = 3 \pm 1\%$.

Для изучения особенностей воздействия на материалы абразивных частиц исследовались профили царапин, искусственно нанесенных с помощью индентора — иглы. Определялась глубина, форма царапины, характер разрушения древесины, а также усилие нанесения царапины. Царапание производилось при различных усилиях со стороны индентора на древесину $N = 0,2; 0,4; 0,6 \text{ Н}$ на микротрибометре.

Глубина и профиль царапины исследовались методом конфокальной (лазерной) микроскопии.

Результаты и их обсуждение. *Сила царапания.* С увеличением давления на индентор сила царапания линейно увеличивается как для натуральной, так

и для прессованной древесины. Увеличение площади поверхности контакта индентора и боковых поверхностей царапины приводит к возрастанию силы трения между ними. Сила царапания для прессованной древесины в 1,2...2 раза меньше, чем для натуральной древесины.

Глубина внедрения индентора. Для прессованной древесины по сравнению с натуральной глубина внедрения индентора уменьшается в 2,5...5,8 раза в зависимости от режима нагружения. Пропитка смазочным материалом способствует увеличению глубины внедрения индентора в 1,15...1,90 раза.

Микроструктура следа трения. Для натуральной древесины края и стенки царапины рваные, с множеством выступов и неровностей (Рис. 1). Это свидетельствует о том, что при прохождении индентора, моделирующего абразивную частицу, волокна древесины расщеплялись или разрушались с образованием очень развитого рельефа царапины.

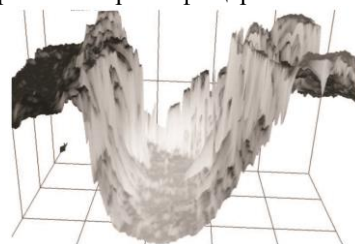


Рис. 1. Микроструктура царапины на натуральной древесине

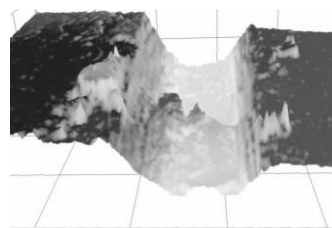


Рис. 2. Микроструктура царапины на прессованной древесине

Профиль царапины, образованной индентором в прессованной древесине, характеризуется отсутствием значительных выступов или углублений (рис. 2). Полученные при моделировании абразивного изнашивания царапины подобны следам трения на контактной поверхности однородного не волокнистого материала.

Эффект расслоения материала и распространения трещин вдоль волокон в модифицированной древесине не наблюдается, что в совокупности определяет ее высокую износостойкость при работе в абразивной среде.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННОСТИ ДИФФУЗИОННЫХ ЗОН
НИКОТРИРОВАННОЙ СТАЛИ 25Х3МЗНБЦА

П.И. Маленко, А.Ю. Леонов, К.Д. Релмасира

Тульский государственный университет, Тула, Россия; malenko@tsu.tula.ru

Под нитрированием подразумевается процесс низкотемпературной химико-термической обработки сталей с целью насыщения их поверхности азотом и углеродом. При нитрировании управляемыми параметрами являются процентное содержание аммиака и эндогаза в смеси, температурный интервал ΔT и время насыщения τ . Содержание аммиака в смеси определяет её азотный потенциал. Процентное соотношение газов берётся фиксированным: 30/70, 50/50 и 70/30. Одновременное насыщение поверхности азотом и углеродом изменяет структуру поверхностного слоя, его износостойкость, усталостные и коррозионные свойства. Процесс насыщения производится при $T \leq 600$ °С, что предотвращает деформации и коробление механически обработанных деталей. В качестве перспективной рассматривалась теплостойкая сталь 25Х3МЗНБЦА [1, 2].

Экспериментальные исследования показали, что нитрированное покрытие представляет собой многослойную структуру, которая в укрупнённом виде представляется в виде нетравящегося “белого” слоя и диффузионной зоны. “Белый” слой имеет толщину $h_{\text{сл}} = 10...20$ мкм и состоит из γ' -однофазных и $(\epsilon+\gamma')$ -двухфазных (Fe_4N , Fe_3N , Fe_2N , Fe_3C , $\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})$) подслоёв [1], в то время как структура диффузионной зоны $h_{\text{дз}} \leq 100$ мкм определяется нитридными (Fe_4N , Fe_3N , и Fe_2N), карбонитридными ($\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})$) и карбидными (Fe_3C) фазами, объёмная доля которых уменьшается по глубине зоны.

Характеристики субструктуры диффузионной зоны (плотности дислокаций ρ и размеры блоков D), определяют гетерогенность зоны, которую оценивали тремя параметрами: размером частиц $D_{\text{ср}}$, расстоянием между частицами $d_{\text{ср}}$ и суммарным объёмом частиц $V_{\text{ч}}$.

Полученные результаты позволяют представить следующую кинетическую последовательность стадии формирования структур диффузионной зоны (рис. 1).

На начальной кинетической стадии ($\tau \leq 2$ ч) формируется в основном малоазотистая Fe_4N -фаза. При этом на поверхности фиксируются минимальные размеры частиц ($D_{\text{ср}}$) и их объём ($V_{\text{ч}}$), но наибольшая линейная плотность (N_d) фаз. На второй стадии ($\tau \approx 4$ ч) формируется среднеазотистая Fe_3N -фаза, вследствие чего частицы нитридов и карбонитридов укрупняются ($D_{\text{ср}}$ и $V_{\text{ч}}$), но среднее расстояние между ними (N_d) уменьшается. На третьей стадии ($\tau \approx 8$ ч) возможно структурообразование в двух направлениях: формирование высшего нитрида Fe_2N и карбонитрида $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$, что обуславливает

заметный рост $D_{\text{ср}}$.

В графическом виде параметры гетерогенности представлены на рис. 2.

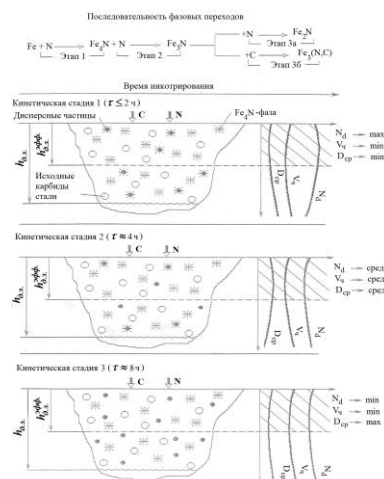


Рис. 1. Кинетические стадии формирования гетерогенных структур диффузионных зон

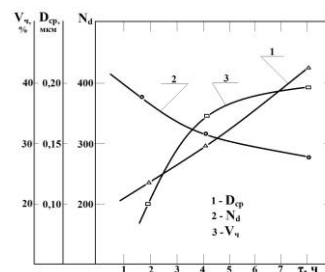


Рис. 2. Влияние времени нитрирования τ на характер гетерогенности структур на поверхности диффузионных зон стали 25Х3МЗНБЦА

Фактор линейной плотности N_d определяется кинетикой формирования фазы Fe_4N . В то же время фактор объёмной плотности предопределяется суммарным содержанием всех пяти рассматриваемых фаз ($\text{Fe}_4\text{N} + \text{Fe}_3\text{N} + \text{Fe}_2\text{N} + \text{Fe}_3(\text{N},\text{C}) + \text{Fe}_3\text{C} = \text{Fe}_m(\text{N},\text{C})$).

1. Зеленко В.К. Структурообразование диффузионных зон нитрированных теплостойких конструкционных сталей и критерии оценки их усталостной долговечности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Зеленко Виктор Кириллович. — Тула, 1998
2. Гордей А.Э. Технология химико-термической обработки: карбонитрирование. Структура и эксплуатационные свойства карбонитридных слоёв стали 25Х2М1Ф // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции студентов “Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии” 4—7 апреля 2012 г. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012

РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ТОРМОЗНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА ОТ УМЕРЕННОГО К ИНТЕНСИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

Н.Г. Меликсетян

Национальный политехнический университет Армении, Ереван n_meliksetyan@mail.ru

Безасбестовые фрикционные материалы уже почти 20 лет успешно используются в тормозных устройствах различных машин. Их трение в условиях поверхностных температур выше 250...280 °С по характеру отличается от низкотемпературного трения [1,2]. Переход процесса изнашивания материалов от умеренного к интенсивному указывает на то, что изменяется механизм разрушения поверхностных слоев.

Цель. Выявление механизма разрушения поверхностных слоев широко распространенных на рынке автозапчастей Армении безасбестовых тормозных фрикционных материалов ведущих европейских фирм Textar, Bosh и ATE в условиях перехода от умеренного к интенсивному изнашиванию.

Результаты и их обсуждение. На лабораторной установке И-32М с моделированием режимных параметров высокотемпературного трения фрикционных накладок дисковых тормозов легковых автомобилей экспериментальному исследованию подверглись серийно выпускаемые безасбестовые тормозные фрикционные материалы ведущих фирм Textar, Bosh и ATE.

Показано, у всех материалов в условиях перехода от умеренного к интенсивному изнашиванию наблюдается уменьшение коэффициента трения. При этом у наиболее износостойкого материала Textar зона этого процесса смещена в область более высоких температур, а у наименее износостойкого материала ATE уменьшение коэффициента трения происходит при более низких температурах.

Исследования напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев выбранных материалов после трения методами рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-2 и растровой электронной микроскопии на электронном сканирующем микроскопе ISM-50A "Jeol" показывают, что для всех материалов имеется сдвиг углового рефлекса и ориентация слоев по направлению трения. В поверхностных слоях всех материалов в направлении скольжения действуют остаточные растягивающие напряжения, а перпендикулярно направлению скольжения — сжимающие, что приводит к растрескиванию поверхности в направлении трения.

Продукты износа имеют форму лепестков и различаются размерами в зависимости от композиционного состава.

Изучение процессов термического расширения выбранных материалов методом дилатометрического анализа на дилатометре системы Ригаку-Денки. показывает, что каждый материал имеет специфический закон изменения коэффициента термического расширения. При сравнительно низких температурах (до 200 °С) эти изменения проявляются более отчетливо. С дальнейшим повышением температуры нагрева резко изменяются коэффициенты термического расширения.

Установлено, что начиная с 200...280 °С в зависимости от типа связующего при повышении температуры наблюдается резкое увеличение относительного удлинения материалов. Это указывает на то, что при трении между рабочим поверхностным слоем и основным материалом, где температура достигает примерно 200...280 °С, образуются поры и трещины, которые распространяются по зонам, где одинаковая температура и наименьшее сопротивление сдвига — почти параллельно поверхности трения. С течением времени эти трещины смыкаются и образуются лепесткообразных тонких продуктов износа.

Выводы. При трении в условиях поверхностных температур выше 200...280 °С наблюдается уменьшение коэффициента трения, а в поверхностных слоях, ориентированных по направлению скольжения, действуют остаточные напряжения. В результате разрушения образуются лепесткообразные продукты износа. Форма образовавшихся продуктов износа, напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев и динамика термического расширения материалов дают основание полагать, что разрушение поверхностных слоев выбранных материалов соответствует деламинационному механизму изнашивания [2].

Благодарности. Работа выполнена в рамках научной темы "Создание и исследование деталей машин и фрикционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов" в базовой проблемной лаборатории «Трибология» НПУА за 2018 г. при финансовой поддержке ГКН МОН РА.

1. Фрикционные композиты на основе полимеров. А.К. Погосян, П.В. Сысоев, Н.Г. Меликсетян и др. — Мн.: Информтрибо, 1992. — 218 с.
2. Suh N.P. An Overview of the Delamination Theory of Wear // Wear. 1974. V. 44. P. 1—16.

БЕЗАСБЕСТОВЫЙ ТОРМОЗНОЙ ТЕПЛОСТОЙКИЙ ФРИКЦИОННЫЙ КОМПОЗИТ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Г. Меликсетян, С.Г. Агбалян, Г.Н. Меликсетян

Национальный политехнический университет Армении, Ереван n_meliksetyan@mail.ru

В условиях технического прогресса создание безасбестовых и экологически безвредных фрикционных материалов является актуальным problemом современного фрикционного материаловедения. На пути к реализации этой проблемы необходимо решить ряд сложных вопросов, связанных с определением типов и количества связующих и наполнителей, выбора производственного оборудования, разработки ресурсосберегающих технологий, расчета и проектирования узлов трения.

Отходы и порошки многокомпонентных минералов Армении с их уникальными свойствами могут быть использованы в качестве сырья для производства безасбестовых и экологически безвредных фрикционных материалов, существенно изменив эксплуатационные характеристики и свойства исходного материала. Этот вопрос имеет важное государственное значение Армении, поскольку создание производства с использованием местного сырья стало жизненно важным требованием [1, 2].

Цель. Разработка технологии получения безасбестовых тормозных теплоустойчивых фрикционных композитов с применением многокомпонентных материалов на основе исследования процессов фрикционного взаимодействия материалов пар трения тормозных устройств.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований были решены задачи по выявлению основных закономерностей влияния температурного режима на свойства безасбестовых тормозных фрикционных материалов; изучению кинетики и механизма высокотемпературного трения и изнашивания безасбестовых фрикционных материалов; разработке технологии получения безасбестовых тормозных теплоустойчивых фрикционных композитов с применением волокон и порошков из многокомпонентных минералов Армении, а также исследованию процесса структурирования и свойств полученных материалов.

Показано, что при температурах 250–400 °С существует прямая корреляция между механохимическими превращениями и трибологическими свойствами фрикционных материалов — чем ниже температурные диапазоны процессов механохимических превращений тем раньше начинается уменьшение коэффициента трения и переход от умеренного к интенсивному изнашиванию.

Установлено, что интенсивное разложение кар-

боната кальция с 40% потерей массы начинается примерно при 750 °С и заканчивается при 900 °С и имеет эндотермический характер. С применением карбоната кальция в композиционных составах многокомпонентных безасбестовых тормозных фрикционных материалов при температурах поверхности трения выше 750 °С в условиях разрушения связующих и армирующих элементов карбонатом кальция поглощается дополнительное количество тепла. Показано, что применение в композиционных составах безасбестовых фрикционных материалов богатых карбонатом кальция мраморного порошка обеспечивает высокий и стабильный коэффициент трения благодаря поглощению дополнительного тепла порошком мрамора.

Разработаны новый теплоустойчивый безасбестовый фрикционный композит Бастенит-9 на полимерной основе с применением многокомпонентных материалов и технология его получения, новизна которых подтверждена а.с. РА на изобретение [3].

Изучен механизм структурообразования композита Бастенит-9, согласно которому волокна и многокомпонентные материалы повышают прочность композита, с полимерным связующим работают как автономные наполнители, одновременно повышая трибологические свойства. Установлено, что композит Бастенит-9 обладает более высокой и стабильной эффективностью торможения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках научной темы «Создание и исследование деталей машин и фрикционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов» в базовых проблемных лабораториях «Трибология» и «Материаловедение и металлургия» НПУА за 2018 г. при финансовой поддержке ГКН МОН РА.

1. Агбалян С.Г., Меликсетян Г.Н. Исследование работоспособности тормозного фрикционного композита, изготовленного из многокомпонентных материалов. Вестник НПУА. — Серия Металлургия, материаловедение, недропользование. — Ереван, 2017. — N 1. — С. 26–33.
2. Меликсетян Н.Г., Агбалян С.Г., Меликсетян Г.Н. Фрикционный перенос при трении безасбестовых тормозных материалов // Сб. труд. XXIV межд. научно-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века». — Донецк. 2017. — С. 160–164.
3. Гогосян А.К., Меликсетян Н. Г., Меликсетян Г. Н. Фрикционная композиция а.с. РА 2909А. // Промышленная собственность. — Официальный бюллетень. — Ереван, 2015 N 1.

МАГНИТНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

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

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия; alnikbltov@rambler.ru

Введение. В настоящее время традиционные трехкомпонентные магнитные жидкости уже хорошо изучены, и их потенциальные возможности, как функционального материала в значительной мере исчерпаны. Для смазывания трибосопряжений, работающих при граничном режиме трения, необходимо создавать специальные магнитные жидкости — магнитные смазочные масла (ММ). Задача данного исследования состояла в разработке основ технологии получения магнитных смазочных масел на основе силоксанов, обладающих высокими магнитными и триботехническими характеристиками.

Компоненты магнитного смазочного масла его синтез. На основании анализа физико-химических свойств в качестве основы магнитных смазочных масел были выбраны синтетические кремнийорганические жидкости ПЭС-5 и ХС-2-1ВВ, обладающие малой испаряемостью, хорошими реологическими характеристиками при низких температурах и высокими смазочными свойствами в широком диапазоне нагрузок.

Для синтеза магнитных масел в основном использовался высокодисперсный магнетит. Для рационального выбора ПАВ-стабилизатора применили диэлектрический критерий [1]. В магнитных смазочных композициях на основе ПЭС-5 и ХС-2-1ВВ растворяли различные присадки.

Базовая технология синтеза магнитных масел включала несколько стандартных этапов. На заключительном этапе в магнитную жидкость для получения масла вводят присадки при температуре $40 \div 50$ °С и тщательном перемешивании.

Результаты экспериментальных исследований. Магнитное масло ММ1-ПЭС (табл. 1, в скобках после марки масла указана дисперсная фаза и стабилизатор) стабилизировано олеиновой кислотой (ОК) и содержит около 6 об.% магнитной фазы. Вязкость масла в несколько раз выше вязкости основы, что нельзя объяснить указанным объемным содержанием магнетита. Намагниченность насыщения масел ММ1-ПЭС не слишком высокая (19–25 кА/м), но этого достаточно, чтобы масло сохраняло хорошую магнитоподвижность в узлах трения.

Магнитное масло ММ1-ПЭС имеет очень хорошую седиментационную и агрегативную устойчивость в градиентных магнитных полях. Малая испаряемость составляющих его компонентов позволяет применять масло в газовой среде и в условиях ваку-

ума при температуре от -40 °С до 100 °С.

Магнитное масло ММ1-ПЭС содержащее 15 мас.% присадки Совол имеет смазочные характеристики сравнимые с характеристиками хорошего трансмиссионного масла ТМ-5-18. Присадка 3Н2ТЭ (хлорированный эфир пентадиена) позволяет существенно улучшить противоизносные свойства магнитного масла ММ1-ПЭС. Высокие смазочные свойства показали синтезированные магнитные масла с присадками на основе олигохлорорганосилоксана ММ1-ХС (стабилизированные модифицированным хлорсилоксаном МХС) (табл. 1). Магнитные масла на основе олигомера ХС-2-1ВВ могут надежно использоваться для смазывания при окружающей температуре от ~ 180 °С до -30 °С.

Таблица 1. Свойства магнитных масел

Смазочная композиция	Машина трения			
	МТП [2]		МТШ-М [2]	
	f	$I_{\text{н}}, 10^{-9}$	f	d, мм
1. ПЭС-5	0,14	14,5	0,21	0,69
2. ММ1-ПЭС (Fe ₃ O ₄ +ОК)	0,12	12,6	0,15	0,6
3. ММ1-ПЭС: + 5 мас.% Совол + 15 мас.% Совол + 20 мас.% Совол	0,08	2,1	0,15 0,13 0,12	0,82 0,48 0,39
4. ММ1-ПЭС + 10 мас.% ДФ-11	0,13	4,1	0,12	0,69
5. ММ1-ПЭС + 5 мас.% 3Н2ТЭ	0,14	3,7	0,16	0,49
6. ММ2-ПЭС (Fe + ХС-2-1ВВ)	0,1	2,0	0,3	0,95
7. ХС-2-1ВВ	0,03	0,5	0,18	0,68
8. ММ1-ХС (Fe ₃ O ₄ + МХС)	0,15	0,6	0,16	0,51
9. ММ1-ХС + 5 мас.% Совол	0,09	0,55	0,15	0,47
10. ММ1-ХС + 5 мас.% ДФ-11			0,13	0,39
11. ТМ-5-18	0,07	0,4	0,15	0,35

Заключение. Современные магнитные масла по смазочным свойствам приближаются к традиционным, а уникальная магнитоактивность придает им дополнительные преимущества в трибоузлах.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-48-690001).

- Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. — 2017(60), № 4. 75-81
- Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // Трение и износ — 2017 (38), № 2, 107-113

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА ТРЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ОРГАНОПЛАСТОВ

М.О. Панова^{1,2}, А.П. Краснов¹, Е.А. Романченко², Л.Ф. Клабукова², В.А. Соловьева¹

¹Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия; krasnov@ineos.ac.ru

²Российский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

Фенолформальдегидные (ФФ) полимеры широко применяются в качестве термостойкого связующего при разработке антифрикционных органо-пластов. Было показано [1], что термостойкое полиоксадиазольное (ПОД) волокно обладает высокой прочностью, износостойкостью и трибохимической стабильностью, что явилось причиной выбора в качестве армирующего наполнителя исследуемых органо-пластов. Кардовый фенолфталеинформальдегидный полимер синтезирован для использования в теплозащитных материалах, при термической обработке которых можно получить более высокие значения коксового числа, чем у традиционного ФФ полимера [2]. В последнее время влияние введения кардовых групп в структуру полимеров на антифрикционные свойства изучают на примере термостойких термопластов [3]. Однако в качестве связующего антифрикционных органо-пластов кардовые ФФ полимеры практически не исследовали.

Целью исследования является установление влияния кардового фрагмента на структуру и свойства ФФ полимера и причин улучшения трибологических характеристик органо-пластов.

Объекты и методы исследования. В работе применяли резольную ФФ смолу ФЭЛ-03 и резольную кардовую ФФ смолу ФФ-40, при синтезе которой наряду с фенолом использовали второй мономер — фенолфталеин (40% масс.) [2]. В качестве армирующего наполнителя использовали ПОД ткань «Арселон». Образцы изготавливали прямым прессованием из препрегов, затем проводили 6-часовую термообработку при $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты испытаний. Из рисунка 1 видно, что процесс трения по схеме «шар-плоскость» органо-пласта со связующим — традиционной ФФ смолой сопровождается интенсивными колебаниями коэффициента трения, на грани заедания (1). Величина износа составила $8 \cdot 10^{-4}$ г.

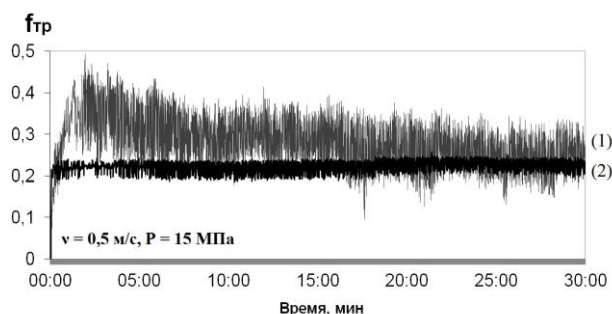


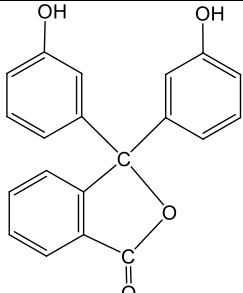
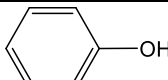
Рис. 1. Фрикционные кривые композитов на основе ФФ смол: ФЭЛ-03 (1) и ФФ-40 (2)

Значительное улучшение фрикционных характеристик происходит при использовании в качестве связующего более термостойкой кардовой смолы ФФ-40 (рис.1 (2)). Величина и амплитуда колебания коэффициента трения снижаются, ту же тенденцию имеет износ, понижающийся до $4 \cdot 10^{-4}$ г.

Предполагалось, что изменения в трении органо-пластов обусловлены термостойкостью и объемом кардового фрагмента в структуре ФФ-40.

Из табл. 1 видно, что расчетный объем кардового фталидного фрагмента значительно превосходит объем фенольной группы, формирующей полимерную сетку при отверждении. В результате даже при дополнительном термическом воздействии, в сегментах сетки сохраняется подвижность, что облегчает сдвиговые усилия при трении.

Таблица 1. Расчетные объемы фрагментов полимерной сетки

Структурная схема	Объем, $\text{\AA}^3$
	297,4
	94,9

Заключение. Таким образом, введение объемного кардового фталидного фрагмента в структуру ФФ полимерного связующего, приводит к резкому изменению двух факторов: повышению термостойкости, а также улучшению трибологических свойств органо-пластов и устойчивости при трибодеструкционных процессах за счет формирования более гибкой полимерной сетки.

1. Бугаев Д.И., Краснов А.П., Наумкин А.В., Юдин А.С., Афоничева О.В., Голубь А.Ю., Горошков М.В., Бузин М.И. // Трение и износ, 2016, № 4, С. 452—459.
2. Коршак В.В., Сергеев В.А., Шитиков В.К., Северов А.А., Назмудинова И.Х., Желтакова С.Г., Бурлуцкий В.Ф., Киселев Б.А., Яременко В.В. // Высокомолекулярные соединения, 1968, Т (А) 10, № 5, С. 1085—1091.
3. Краснов А.П., Горошков М.В., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Аскадский А.А., Наумкин А.В., Маслаков К.А., Сорокин А.Е., Трение и износ, 2019, 1 (40), 25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЕИДА Ф НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ ПТФЭ-КОМПОЗИТОВ ДЛЯ УЗЛОВ СТАЦИОНАРНОГО ТРЕНИЯ

А.Н. Сенатрев, В.К. Меринов, Т.А. Ахметов

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, senatrev111@mail.ru

ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Беларусь

Введение. В технике, особенно в конструкциях технологических машин широко используются фрикционные узлы стационарного трения, т.е. узлы, обеспечивающие стабильный момент трения на длительных промежутках времени при заданных нагрузочно-скоростных и температурных режимах эксплуатации. Преимущественно для фрикционных узлов стационарного трения используются композиционные материалы на основе термостойких полимерных матриц, в качестве которых применяется в том числе и политетрафторэтилен [1]. В настоящей работе исследовали влияния малеида Ф на триботехнические характеристики, теплостойкость, и твердость композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) для узлов стационарного трения.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбран композиционный материал, изготавливаемый из ПТФЭ (ГОСТ 10007-80), модифицированный малеидом Ф (ТУ 6-14-1004-87). Образцы для проведения фрикционно-износных испытаний изготавливали методом прямого прессования с последующей термической и механической обработкой. Прессование осуществляли при удельной нагрузке 100 МПа. Термообработка проводилась в электропечи SNOL 180/400. Фрикционно-износные испытания проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал—частичный вкладыш». Материал контртела — сталь марки ст.45 с твердостью до 50 HRC и шероховатостью поверхности трения $R_a = 0,52$ мкм. Перед началом испытаний осуществляли приработку до достижения фактической площади фрикционного контакта не менее 90% от контурной площади. Температура окружающей среды во время испытаний находилась в пределах $T = 22-24$ °C. После приработки и каждого испытания поверхность металлического контртела очищалась от пленки переноса. Фрикционные испытания проводились при удельной нагрузке $P = 2$ МПа и скорости относительного скольжения $v = 1$ м/с. Теплостойкость композитов определяли по температуре размягчения методом Вика на приборе FWV 633.10. Исследование твердости композитов проводилось по методу Бринелля на приборе НР 250 путем вдавливания шарика диаметром 5 мм в поверхность плоскопараллельного образца. Диаметр отпечатка измеряли с точностью до 0,01 мм на микроскопе МИР-12.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что введение в ПТФЭ-матрицу до 20 мас.% малеида Ф приводит к повышению теплостойкости ПТФЭ более чем на 100°C, твердость повышается на 20%,

интенсивность изнашивания уменьшается более чем в 700 раз. При термообработке ПТФЭ композита при температуре 380 °C потеря массы композита не превышает 0,6%, при тех же условиях термообработки чистый малеид Ф теряет до 11% массы (рис. 1). Таким образом деформации подвергаются в основном поверхностные слои образцов. Показано, что оптимальная область наполнения ПТФЭ малеидом Ф лежит в диапазоне 10—18 мас.%. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности изнашивания $I_h \times 10^{-9}$ композита вида ПТФЭ+малеид Ф от концентрации наполнителя.

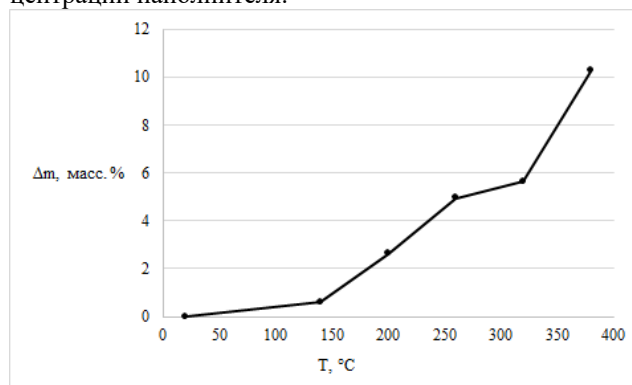


Рис. 1. Зависимость потери массы Δm малеида Ф от температуры термообработки T

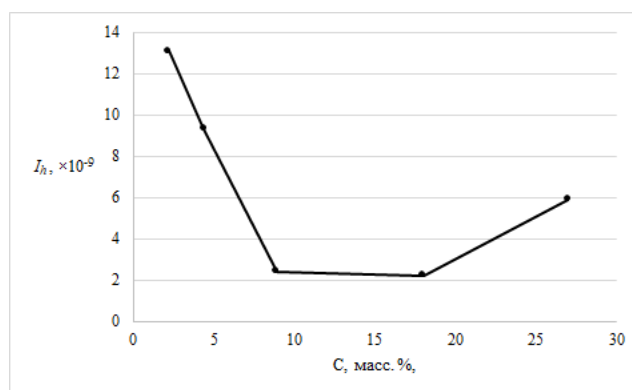


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания $I_h \times 10^{-9}$ от концентрации малеида Ф

1. Исследование влияния оксида железа (III) на триботехнические и виброакустические характеристики фрикционных композитов для узлов стационарного трения / С.Н. Бухаров, В.К. Меринов, А.Н. Сенатрев, В.П. Сергиенко // Трение и износ. — 2018. — Т. 39, № 6. — С. 364—370

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ АЗОТИРОВАННЫХ В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ

М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк, В.С. Курской, Ю.М. Білик

Хмельницкий национальный университет, Украина; vk702713@gmail.com

Цель исследования — изучение физико-химических и трибологических характеристик конструкционных сталей азотированных в безводородных средах в тлеющем разряде (БАТР) в автономном режиме, т.е. с учетом влияния контролируемых энергетических характеристик (напряжение, плотность тока, удельная мощность разряда).

Материалы и методы. Для проведения исследований выбраны стали 20, 45, 45Х, У8А, 38ХМЮА, 12Х18Н10Т. Сталь 38ХМЮА взята для изучения влияния легирующих элементов на физико-химические характеристики поверхностей после БАТР.

Исследования проводили с использованием металлографического, электронно-микроскопического, рентгеноструктурного анализов. Структуру диффузионного слоя и распределение микротвёрдости по глубине слоя изучали на травленых шлифах. Субмикроскопическую структуру нитридной зоны исследовали на растровом микроскопе РЭМ-101м. Рентгеноструктурный анализ азотированных поверхностных слоёв проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с использованием $k\alpha$ -излучения. Износостойкость азотированных поверхностей исследовалась на машине трения УМТ-2168.

БАТР проводили на промышленной установке УАТР-1 которая соответствует модели диодного типа на постоянном токе и дополнительно укомплектована нагревательными элементами, размещёнными в газоразрядной камере, что дает возможность произвольно менять напряжение U , а плотность тока j (отношение значения тока к общей площади садки и подвески) определялась комбинацией температуры, состава газовой смеси и её давления.

Результаты и обсуждение. В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено, что при азотировании с независимыми энергетическими режимами для поддержки тлеющего разряда в газоразрядной камере необходимо значительно меньшие значения напряжения u и плотности тока j . При этом при $u = \text{const}$ для поддержания тлеющего разряда необходимо увеличение j , а при $j = \text{const}$, наоборот, уменьшается u при увеличении давления газовой смеси. В общем случае снижение энергетических параметров негативно влияет на процесс азотирования: уменьшается микротвёрдость поверхности, толщина азотированного слоя нитридной зоны и, соответственно, износостойкость при абразивном изнашивании.

В соответствии с энергетической теорией безводородного азотирования в тлеющем разряде [1], разработанной в Подольском научном физико-технологическом центре, при азотировании происходят такие основные процессы: образование нит-

ридов, распыление поверхности и диффузия азота. Энергетические уровни происхождения основных субпроцессов существенно отличаются. При этом образование нитридов происходит при низких значениях энергии, а процесс распыления поверхности активизируется при повышении напряжения. В свою очередь, диффузия азота происходит при высоких значениях плотности тока.

Таким образом, структура и фазовый состав азотированных слоёв определяется комбинацией режимных и энергетических параметров. Например, при повышении удельной мощности энергетического потока предварительно образовавшийся слой нитридов распыляется и стимулируется процесс диффузии азота в глубину поверхности. В случае, когда энергия потока недостаточна для распыления образовавшегося нитридного слоя, он выступает в роли барьера, который препятствует процессу диффузии во внутренние слои металла и приводит к низким показателям физико-химических и трибологических свойств азотированных слоёв. Так, анализ экспериментальных данных свидетельствует, что уменьшение значений напряжения и плотности тока приводит к снижению поверхностной микротвёрдости сталей. Анализ распределения микротвёрдости по глубине модифицированного слоя показывает, что при незначительных отличиях в градиенте её изменения, абсолютные значения микротвёрдости образцов, азотированных при более высоких энергетических показателях, являются более высокими по всей глубине слоя.

Зависимость износостойкости модифицированных поверхностей от энергетических параметров разряда была подтверждена при проведении трибологических исследований. В результате экспериментов было установлено, в условиях сухого трения для поверхностей, модифицированных при более высоких энергетических показателях, интенсивность износа и период приработки уменьшаются, а период постоянного износа — увеличивается. При этом, при увеличении содержания легирующих элементов эта зависимость становится более ярко выраженной.

Заключение. Обеспечение независимости энергетических параметров (автономный режим) технологического процесса в ходе азотирования металлических поверхностей в безводородной среде позволяет в широких пределах изменять структуру поверхностного слоя и, соответственно, трибологические свойства обработанных поверхностей.

1. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. — Харьков: Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». — 2006. — 364 с.

ВЛИЯНИЕ СТЕАРАТА МАРГАНЦА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОВАРНЫХ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

В.В. Терентьев¹, И.А. Телегин¹, О.Б. Акопова²

¹Ивановская ГСХА, Иваново, Россия; vladim-terent@yandex.ru

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

Введение. Как показали проведенные ранее исследования, одним из перспективных путей улучшения антифрикционных и противоизносных свойств товарных смазочных материалов является добавка с ним жидкокристаллических соединений [1—5].

Цель. Исследование влияния на трибологические характеристики товарных трансмиссионных масел добавки в виде стеарата марганца, проявляющего при определенных условиях мезоморфизм.

Материалы и методы. В качестве базового материала для исследований использовалось трансмиссионное масло марки TM-3-18 SAE 80w90 API GL-3 производства ООО «Тектрон». В качестве добавки к товарному маслу исследовался стеарат марганца, полученный методом химического синтеза. Исследование трибологических характеристик осуществлялось на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «вращающийся ролик — неподвижный шар». Материал ролика — сталь 40Х, материал шара — сталь ШХ-15. При исследованиях определялся коэффициент трения, линейная интенсивность изнашивания. Линейная скорость скольжения принималась равной 1 м/с. Нагрузка на образцы изменялась ступенчато от 200 Н до 600 Н. Противозадирные свойства определялись посредством плавного повышения нагрузки на образцы до резкого, скачкообразного повышения момента трения. Смазка образцов осуществлялась посредством окунания подвижного ролика в ванну с маслом.

Результаты и их обсуждение. Как показали проведенные исследования, добавка к трансмиссионному маслу в виде стеарата марганца позволяет улучшать как антифрикционные, так и противоизносные характеристики масла. Коэффициент трения снижается более чем в 2,2 раза (в зависимости от нагрузки на образцы). Улучшение антифрикционных характеристик смазочного материала приводит к снижению тепловыделения при трении образцов. В процессе эксперимента наблюдалось снижение температуры смазочного материала в объеме ванны в зависимости от нагрузки на образцы от 12 до 24%.

Результаты определения интенсивности изнашивания неподвижного образца (шара) при нагрузке 200 Н представлены на рис. 1.

Видно, что стеарат марганца снижает интенсивность изнашивания неподвижного образца в 6,15 раз.

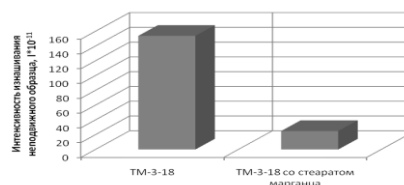


Рис. 1. Результаты определения интенсивности изнашивания неподвижного образца

Исследованный стеарат марганца при добавке его в трансмиссионное масло улучшает и противозадирные свойства последнего (в результате исследований установлено повышение нагрузки, при которой происходит задир образца в среднем на 13,5%).

Улучшение трибологических характеристик масла при введении в него стеарата марганца очевидно связано с возможным переходом его в мезофазу при повышении температуры в процессе трения образцов (особенно в условиях высоких нагрузок).

Таким образом, исследованный стеарат марганца является перспективной добавкой к товарным трансмиссионным маслам, позволяющей улучшать их трибологические характеристики.

Благодарности. Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ, (№ 16.1037.2017/ 4.6).

1. Терентьев В.В., Акопова О.Б., Телегин И.А., Ельникова Л.В., Парунова Ю.М. Спектральные свойства карбоксилатов меди и опыт их применения в узлах трения сельскохозяйственной техники // Аграрный вестник Верхневолжья. — 2019, № 1 (26), 79—84.
2. Терентьев В.В., Телегин И.А., Рябинин В.В. Повышение износостойкости трибосопряжений сельскохозяйственной и автотракторной техники путем совершенствования смазочных материалов // Известия Международной академии аграрного образования. — 2017, № 35, 151—157.
3. Терентьев В.В., Акопова О.Б., Телегин И.А. Влияние мезогенной присадки бегената меди на реологические и триботехнические характеристики пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. — 2017, Т. 17, № 1, 93—100.
4. Терентьев В. В., Акопова О.Б., Телегин И.А. Влияние присадок из смесей карбоксилатов меди на трибологические характеристики пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование, 2015, Т. 15, № 4, 96—101.
5. Терентьев В.В., Акопова О.Б., Телегин И.А. Влияние на трибологические характеристики пластичных смазок карбоксилатов меди на основе валериановой и изовалериановой кислот // Жидкие кристаллы и их практическое использование. — 2016, Т. 16, № 2, 100—105.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ДВУХСЛОЙНОГО УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВАЕ.В. Торская¹, И.Н. Ковалева²¹Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва, Россия; torskaya@mail.ru²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Наличие тонких поверхностных слоев различной природы оказывает существенное влияние на контактное взаимодействие, в особенности на микроуровне, и на адгезионное взаимодействие. В существующих работах по адгезионному взаимодействию поверхностных слоев обычно используются упрощенные модели материала. В рамках данного исследования предложена постановка и метод решения задачи об адгезионном взаимодействии осесимметричного жесткого штампа произвольной формы и упругого слоя произвольной толщины, скрепленного с упругим полупространством.

Описание модели и метода решения. Рассматривается адгезионное взаимодействие жесткого осесимметричного тела и двухслойного упругого полупространства. Между поверхностями имеет место адгезионное взаимодействие без контакта, которое рассматривается с использованием потенциала Леннарда-Джонса, включающего члены, зависящие от зазора между телами и отвечающие за притяжение и отталкивание. Форма зазора определяется упругими перемещениями поверхности двухслойного полупространства. В связи со взаимным влиянием величины зазора и адгезионных сил для определения формы деформированной поверхности используется итерационная процедура, на каждом шаге которой зависимость сил адгезии от координаты интерполируется полиномиальной функцией, допускающей аналитическое преобразование Ханкеля. Это позволяет определить не только упругие перемещения поверхности, но и напряжения в слое и полупространстве.

Результаты расчетов. В результате расчетов установлено, что при отсутствии контакта индентора с двухслойным упругим телом на границе раздела слоя с основанием действуют нормальные напряжения, работающие на отрыв слоя от основания, которые зависят от жесткости и толщины слоя. При превышении пороговых значений, зависящих от природы сцепления на границе раздела слоя и основания, возможен отрыв поверхностного слоя.

На рис. 1 представлено распределение нормальных напряжений на границе раздела слоя и более жесткой подложки (отношение модулей упругости слоя к модулю подложки считалось равным 0.1). Варьировалась толщина слоя и положение штампа относительно недеформированной поверхности. При данных расчетах рассматривался штамп с плоской поверхностью. Кривая 1 является базовой, кривая 2 получена для случая более толстого покрытия (толщина была увеличена в 5 раз); кривая 3 соответствует случаю увеличенного зазора между штампом и поверхностью.

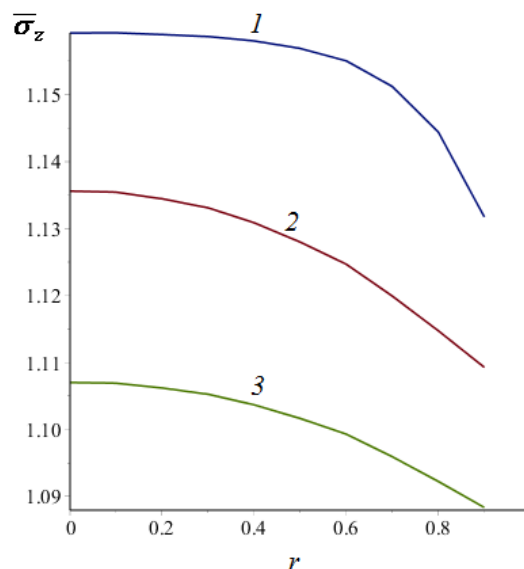


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений на границе раздела слоя с подложкой.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 18-58-00014) и Белорусского фонда фундаментальных исследований (грант БРФФИ 18P-061).

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

М.Н. Верещагин¹, М.Ю. Целуев², С.Н. Целуева¹

¹Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

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

Введение. Одной из распространенных технологических схем лазерной обработки металлических деталей является лазерное “глазурирование” нанесенного тонкого слоя порошка на подложку [1]. Это обеспечивает возможность получения микрокристаллических и аморфных структур в тонких поверхностных слоях деталей [2]. Наличие взаимодействия пары расплав-деталь под воздействием лазерного луча позволяет фиксировать высокие скорости охлаждения, порядка $10^5 \dots 10^7$ К/с. Импульсное плавление малых объемов металла на поверхности обеспечивает получение гомогенных жидкостей (расплавов), которые после кристаллизации могут фиксировать структуру жидкости с уникальными свойствами.

Целью работы является исследование процесса модифицирования поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой.

Материалы, оборудование и методы исследования. Материалы основы образцов — стали Ст3, 45, 20Х13. Материал покрытия — сплав системы Fe-Ni-Co-Cr-Mo-B-Si.

Экспериментальная установка, включающая лазерную установку для импульсной сварки, резки и термообработки Квант-15 и координатный стол.

Структуру и фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного и рентгенофазового на дифрактометре Дрон-3, микротвердость — на приборе ПМТ-3 в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 9450-76, микроструктуру — на металлографическом микроскопе Метам-Р1, триботехнические характеристики — при торцевом трении в соответствии с ГОСТ 23.211-80.

Результаты и их обсуждение. Наиболее значимым фактором импульсной лазерной поверхностной обработки (ИЛПО) с изменением химического состава является плотность мощности (величина энерговклада) лазерного излучения (ЛИ) на обрабатываемой поверхности. Установлено наличие трех диапазонов энерговклада при ИЛПО. При среднем энерговкладе происходит процесс лазерной наплавки материала с незначительным изменением химического состава наплавляемого слоя, при этом формируется высокая адгезионная связь между покрытием и заготовкой.

Наплавка покрытия из сплава системы Fe-Ni-Co-Cr-Mo-B-Si на металлическую основу из сталей Ст3, 45, 20Х13 начинается при плотности ЛИ на поверхности обработки $1800 \dots 2000$ Вт/мм², а легирование — при $3500 \dots 4000$ Вт/мм².

Другим важным фактором ИЛПО является частота следования импульсов ЛИ.

При ИЛПО зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение: зона оплавления (ЗО) — количество аморфной фазы составляло 70...80%, кристаллическая составляющая представлена α -фазой, интерметаллическими соединениями FeCr и FeCrMo и металлическим соединением Fe₂B, микротвердость ЗО составляла 800...910 HV; зона термического влияния (ЗТВ) — структура слоя обусловлена неполной и негомогенной (по углероду) аустенизацией материала основы образцов в условиях высокоскоростного лазерного нагрева; третий слой имеет структуру и микротвердость исходного состояния материала основы образцов.

При наплавке аморфизируемого сплава на основе железа на металлическую основу из стали 45 аморфно-кристаллический (до 25% кристаллической фазы) слой имеет толщину 75...100 мкм и микротвердость 800...870 HV. ЗТВ характеризуется структурной неоднородностью — вблизи границы оплавления вокруг мартенсита образуется тростито-ферритная сетка, переходящая в ферритную. Микротвердость ЗТВ — 290...350 HV. ЗТВ имеет толщину 15...25 мкм и переходит в исходную ферритно-перлитную структуру с микротвердостью 120...140 HV.

ИЛПО с изменением химического состава поверхности в режиме наплавки позволяет получать износостойкие покрытия, причем для аморфно-кристаллического покрытия фактически отсутствует период приработки и снижается склонность к схватыванию при коэффициенте трения 0,17...0,2.

Заключение. На основании полученных экспериментальных данных при получении износостойких покрытий с аморфной и аморфно-кристаллической структурой на поверхности металлических изделий методом ИЛПО с изменением химического состава поверхности рекомендуется использовать средний диапазон энерговклада (определяемый для различных материалов экспериментально или с помощью соответствующих математических моделей) и частоту следования импульсов излучения до 3...8 Гц.

1. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
2. Криштал, М.Л. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера / М.Л. Криштал, А.А. Жуков, А.Н. Кокора. — М.: Металлургия, 1973. — 192 с.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 5

Механика полимерных композитов и моделирование

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2019)

25—28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИЗНОСА И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

М.В. Чернец¹, В.Е. Старжинский²¹Люблинская политехника, Люблин, Польша; Национальный авиационный университет, Киев, Украина
m.czerniec@pollub.pl; myron.czerniec@gmail.com²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. В настоящее время металлополимерные и полимерные зубчатые передачи различного вида находят достаточно широкое применение. Однако методы расчета их износа и долговечности в литературе отсутствуют. Лишь в работе [1] проведен расчет цилиндрической передачи с полиамидным колесом, армированным стеклянными и углеродными волокнами. В известных в литературе методах расчета зубчатых передач с металлическими колесами используется закон абразивного изнашивания Архарда. Однако данные экспериментальных исследований изнашивания полимерных композиционных материалов указывают, что их разрушение при сухом трении происходит, как правило, по усталостному, а не абразивному механизму изнашивания.

В работах докладчика [2, 3 и др.] разработаны методы расчета триботехнических характеристик различного вида зубчатых передач (прямо- и косозубых цилиндрических и конических), базирующиеся на модели усталостного изнашивания при трении скольжения.

Цель работы. Модификация методов расчета износа и долговечности металлических зубчатых передач с целью его применения для расчета металлополимерных и полимерных передач. Расчет некоторых видов указанных передач.

Метод исследования. Его положения изложены в ряде предыдущих работ, а пример расчета прямозубой цилиндрической передачи с полиамидным колесом, армированным стеклянными и углеродными волокнами, приведен в [4].

Износ зубьев h'_{kj} в одном обороте колеса

$$h'_{kj} = \frac{v_j t'_j (f p_{j\max})^{m_k}}{C_k \tau_S^{m_k}}, \quad (1)$$

где $t'_j = 2b_j / v_0$ — время износа зубьев на протяжении перемещения j -той точки их контакта по контуру зуба на ширину площадки контакта $2b_j = \text{const}$; $p_{j\max}$ — максимальное начальное контактное давление в j -ой точке зацепления зубьев; k — нумерация колес (1 — шестерня, 2 — зубчатое колесо); $v_0 = \omega_1 r_1 \sin \alpha$ — скорость перемещения точки контакта по профилю зуба; ω_1 — угловая скорость шестерни; r_1 — радиус делильной окружности

шестерни; v_j — скорость скольжения; $\alpha = 20^\circ$ — профильный угол; f — коэффициент трения скольжения; C_k, m_k — характеристики износостойкости материалов зубчатых колес для принятых условий; $\tau_S = 0.5\sigma_B$ — предел прочности композита на срез; σ_B — предел прочности материалов колес при растяжении.

Долговечность t_* зубчатой передачи до допустимого износа h_{k*} зубьев вычисляется так:

$$t_* = h_{k*} / \bar{h}_{kj}, \quad \bar{h}_{kj} = 60 n_k h'_{kj}, \quad (2)$$

где $\bar{h}_{kj}$ — линейный износ зубьев в точках j профилей за час работы; n_k — соответственно частоты вращения колес.

Для определения $p_{j\max}$ та $2b_j$ использованы формулы Герца

$$p_{j\max} = 0.564 \sqrt{N' \theta / \rho_j}, \quad 2b_j = 2.256 \sqrt{\theta N' \rho_j}, \quad (3)$$

где $N' = N / bw$; $N = 9550P / r_1 n_1 \cos \alpha$ — сила, действующая в зацеплении; P — мощность на ведущем валу; b — ширина шестерни; w — количество пар зацеплений зубьев; $\theta = (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2$; E, ν — модуль Юнга та коэффициент Пуассона материалов колес; ρ_j — приведенный радиус кривизны профилей зубьев.

Приведены результаты расчета цилиндрических прямо- и косозубых металлополимерных передач.

1. Shil'ko S.V., Starzhinskii V.E. Prediction of Wear Resistance of Gearing with Wheels Made of Reinforced Composites // Journal of Friction and Wear, No. 3, 1993, 7—13
2. Chernets M.V., Yarema R.Ya., Chernets Ju.M. A method for the evaluation of the influence of correction and wear of the teeth of a cylindrical gear on its durability and strength. Part 1. Service live and wear // Materials Science, 2012, No. 3, 289—300
3. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Evaluation of the Strength, Wear, and Durability of a Corrected Cylindrical Involute Gearing, with Due Regard for the Tooth Engagement Conditions // Journal of Friction and Wear. — 2016, № 1, 71—77
4. Chernets M.V., Shil'ko S.V., Pashechko M.I., and Barshch M. Wear resistance of glass- and carbon-filled polyamide composites for metal-polymer gears // Journal of Friction and Wear. — 2018, No. 5, 361—364

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКИХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕЗОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.В. Шилько

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

Введение. Общей тенденцией развития материаловедения (в т.ч. трибоматериаловедения) является поиск эффективных способов получения конструкционных и функциональных полимерных композиционных материалов (ПКМ) введением структурно-активных (упрочняющих, антифрикционных) ультрадисперсных и наноразмерных наполнителей-модификаторов. Несмотря на значительный объем экспериментальных данных, накопленных в рассматриваемой области, многообразие применяемых наполнителей, матричных материалов, способов их модификации и условий функционирования получаемых изделий, актуальна разработка в известной степени универсального подхода к созданию новых ПКМ, исходя из требований, предъявляемых к изделию.

На наш взгляд, такие возможности связаны с развитием междисциплинарной концепции, основанной на совместном использовании достижений механики деформируемого твердого тела, физики прочности и трибологии, а также нано-, аддитивных и информационных технологий.

Целью работы является создание конструкционных и антифрикционных композитов с оптимальными показателями прочности, деформационных и трибологических свойств на принципах мультимасштабного моделирования структурно-неоднородных материалов. В цели работы отражена современная тенденция разработки композитов, исходя из требуемых свойств путем «конструирования» структуры методами компьютерного моделирования и виртуальных испытаний.

Методы исследования. Таксономический анализ, механические и триботехнические испытания материалов, аналитические и численные решения задач теории упругости, включая контактные задачи с трением.

Результаты и их обсуждение. Исследование включало мультимасштабное моделирование структуры и свойств ряда дисперсно-наполненных полимерных материалов; построение и верификацию их механико-математических моделей, трибоиспытания композитов на основе СВМПЭ и ПТФЭ, оптимизационные расчеты трибосопряжений и элементов конструкций из ПКМ.

Как показано на рисунке, алгоритм предлагаемого метода представляет собой итерационную процедуру, при завершении которой полученная CAD модель может быть использована для 3D печат

ти изделий из КМ оптимизированного состава.

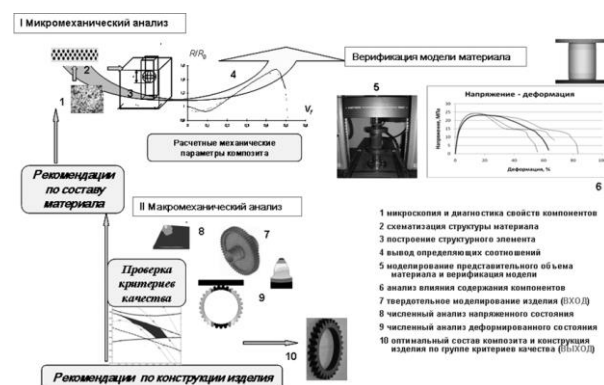


Рис. Схема метода оптимизации состава полимерных композитов на основе мезомеханического моделирования

1. Анализ структуры и диагностика свойств компонентов;
2. схематизация структуры материала;
3. построение структурного элемента;
4. вывод определяющих соотношений;
5. мезомеханическое моделирование представительного объема материала и верификация модели;
6. анализ влияния содержания компонентов;
7. твердотельное моделирование изделия;
- 8 численный анализ напряженного состояния изделия (например, элемента трибосопряжения);
- 9 численный анализ деформированного состояния изделия;
- 10 оптимальный состав композита и конструкция изделия по группе критериев качества.

Заключение.

Проведены систематические расчетно-экспериментальные исследования структуры и особенностей деформирования, трения и изнашивания дисперсно-наполненных полимерных материалов, включая биосовместимые композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и политетрафторэтилена. Показаны возможности прогнозирования эксплуатационных характеристик трибоматериалов и трибосопряжений и компьютерного дизайна материалов — оптимизации состава ПКМ методами мультимасштабного моделирования, исходя из заданных эффективных характеристик.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проекты T18P-286, T18KOPG-004).

SEVEN METHODS OF ESTIMATING THE INTERFACIAL STRENGTH PARAMETERS IN A PULL-OUT TEST

S. Zhandarov¹, E. Mäder^{2,3}, U. Gohs^{2,3}

¹V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus;
serge.zhandarov@gmail.com

² Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Dresden, Germany

³ Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

Single fiber pull-out test is one of the most popular micromechanical techniques for determining strength parameters at fiber–matrix interfaces. In this test, a fiber embedded in a polymer or other matrix to a certain length is being pulled out and the corresponding force–displacement curve (Fig. 1) is recorded. A theoretical model [1] relates three experimentally measured characteristic force values, F_d , $F_{\max}$ and F_b (see Fig. 1) to two interfacial strength parameters, local interfacial shear strength (IFSS) (τ_d) and interfacial frictional stress (τ_f). In other words, we have a set of three independent equations (applied force at points F_d , $F_{\max}$ and F_b) for two variables, τ_d and τ_f :

$$F_d = F_d(\tau_d, l_e, \text{specimen geometry}) \quad (1)$$

$$F_{\max} = F_{\max}(\tau_d, \tau_f, l_e, \text{specimen geometry}) \quad (2)$$

$$F_b = F_b(\tau_f, l_e, \text{specimen geometry}) \quad (3)$$

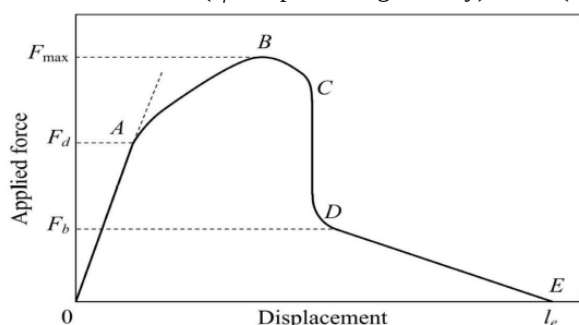


Fig. 1. Idealized force–displacement curve in the pull-out test

Since set (1)–(3) is overestimated, there are several (exactly seven) different methods to get τ_d and τ_f :

1) τ_d from Eq. (1), then τ_f from Eq. (2) (“traditional” method) [1]

2) τ_d from Eq. (1), τ_f from Eq. (3) [2]

3) τ_d from Eq. (1), τ_f from $\min(\Delta F_{\max})^2 + (\Delta F_b)^2$

4) τ_f from Eq. (3), then τ_d from Eq. (2) (“alternative” method) [3]

5) τ_f from Eq. (3), τ_d from $\min(\Delta F_{\max})^2 + (\Delta F_d)^2$

6) τ_d and τ_f from exact $F_{\max}$ and $\min(\Delta F_d)^2 + (\Delta F_b)^2$

7) τ_d and τ_f from $\min(\Delta F_d)^2 + (\Delta F_{\max})^2 + (\Delta F_b)^2$

If all assumptions of model [1] (cylindrical specimen, elastic components, and constant frictional stress) were satisfied, the theoretical force–crack length curve would go through all three characteristic points, F_d , $F_{\max}$ and F_b , and not depend on which two points were selected for the evaluation. In this case, all seven methods would be equivalent. However, the specimen shape in most pull-out tests is essentially non-cylindrical, which affects the positions of F_d , $F_{\max}$ and F_b points. Therefore, methods (1)–(7) should yield different results. We applied all these methods to determine τ_d

and τ_f from a wide set of force–displacement curves. Both theoretical curves generated for real-shaped specimens with known interfacial parameters [4] and experimental curves from real pull-out tests [5] were analyzed. Two typical examples are presented in Table 1.

Table 1. Interfacial strength parameters determined used different methods

Method	Theoretical curve E-glass + epoxy		Experimental curve E-glass + PP	
	τ_d , MPa	τ_f , MPa	τ_d , MPa	τ_f , MPa
1 (F_d , $F_{\max}$)	53.53	7.27	15.22 32.14	8.73 3.90
2 (F_d , F_b)	53.53	5.00	15.22 32.14	8.24 8.24
3 (F_d , best { $F_{\max}$, F_b })	53.53	5.71	15.22 32.14	8.44 6.95
4 (F_b , $F_{\max}$)	60.90	5.00	17.59 17.59	8.24 8.24
5 (F_b , best { F_d , $F_{\max}$ })	56.87	5.00	16.01 26.39	8.24 8.24
6 ($F_{\max}$, best { F_d , F_b })	58.35	5.81	16.25 23.89	8.53 6.62
7 (best { F_d , $F_{\max}$, F_b })	56.21	5.45	15.77 27.59	8.39 7.36
Nominal values	60	5	—	—

Note: For experimental curve, two different values correspond to different virtual “kinks” (F_d values).

As can be seen, the “alternative” method (No. 4) yields the least error for local IFSS and gives absolutely exact value of the interfacial frictional stress. All other methods are essentially worse, especially those which use directly measured F_d values. The reason is that the kink initiates in an essentially non-cylindrical part of the specimen, and the kink point in a force–displacement curve is typically diffuse (or even multiple) so that the F_d value cannot be measured reliably, while the $F_{\max}$ and F_b are quite distinct. Therefore, the “alternative” method, which does not use the F_d value at all, is the best one, and the “traditional” method often yields errors in τ_d comparable with the τ_d value itself.

1. Zhandarov S., Mäder E. J. Adhesion Sci. Technol. 2005 (19), No. 10, 817–855.
2. Mäder E., Moerschel U., Effing M. JEC Compos. Mag. 2016 (102), 49–51.
3. Zhandarov S., Mäder E. Int. J. Adhesion & Adhesives 2014 (55), 37–42.
4. Zhandarov S., Mäder E. J. Adhesion Sci. Technol. 2014 (28), No. 1, 65–84.
5. Zhandarov S., Mäder E., Gohs U. Materials 2018, 11, 2406.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ТРУБЕ С ПОДАТЛИВОЙ ОБОЛОЧКОЙ И ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ

В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, Е.А. Голубева, Ю.В. Василевич

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; mozh@gsu.by

Постановка задачи. В системе теплоснабжения широко используются трехслойные полимерные и композитные трубы, которые необходимо рассчитывать не только на прочность, но и на деформативность, изменения формы слоистой трубы вследствие изменяющихся во времени вязкоупругих свойств [1].

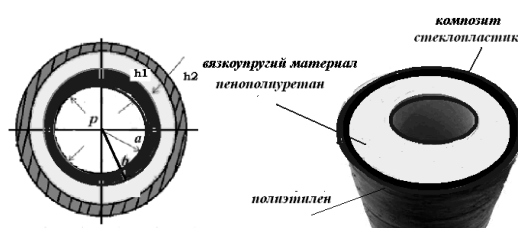


Рис. 1. Пример трёхслойной трубы для теплоснабжения. Цилиндр в податливой оболочке под действием внутреннего давления.

В связи с этим, рассмотрим задачу о бесконечно длинном упругом цилиндре, заключенном в податливую (например, полиэтиленовую) оболочку и полиуретановой теплоизоляцией, 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 с вязкоупругой полиуретановой теплоизоляцией.

Методы исследования. Примем, что поведение оболочки и трубы описываются физическими уравнениями теории упругости, а наполнителя — уравнениями вязкоупругости. Используется операторный метод решения задачи вязкоупругости для трехслойной трубы, считая, что полиуретан обладает реономными свойствами (заменяя модуль упругости на временной оператор по принципу Вольтерра). Необходимо: решить систему алгебраических уравнений с временными операторами при заданных геометрических и физических параметрах, найти напряжения и перемещения.

Полученные результаты. Приняв уравнение равновесия в перемещениях

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = 0,$$

ищем решения для расчета композитной трубы, считая (в общем упругом случае), что материал цилиндра (т.е. внутреннего слоя) — функционально-градиентный с $E(r) = E_0 r^\beta$, $-2 \leq \beta \leq 2$.

$$u_r^1 = A_1 r^{m_1} + B_1 r^{m_2},$$

где $m_{1,2} = \frac{1}{2} \left(-\beta \pm \sqrt{4 + \beta^2 - 4\beta\nu^*} \right)$, для наполнителя и оболочки

$$u_r^{(i)} = A_i r + B_i / r, \quad i = 2, 3.$$

Постоянные A_i, B_i определяются из граничных условий

$$\begin{aligned} u_{r/r=b}^{(1)} &= u_{r/r=b}^{(2)}, \\ \sigma_{r/r=a}^{(1)} &= -p, \quad \sigma_{r/r=b+h1}^{(2)} = \sigma_{r/r=b+h1}^{(3)} u_{r/r=b+h1}^{(2)} = u_{r/r=b+h1}^{(3)}, \\ \sigma_{r/r=b}^{(1)} &= \sigma_{r/r=b}^{(2)} \quad \sigma_{r/r=b+h1+h2}^{(3)} = 0 \end{aligned}$$

Алгоритм решения задачи. Решается система уравнений при заданных геометрических и физических параметрах (с учётом функционально-градиентного материала цилиндра), а затем для вязкоупругого случая применяется алгебра операторов. Полученные коэффициенты подставляем в физические уравнения для определения напряжений и перемещений в трубе. Для тестирования результатов и упрощения вычислений, расчет производился для времени $t = 0, t = \infty$. Программа по заранее определенному алгоритму строит матрицу и вектор свободных членов системы линейных алгебраических уравнений, решает ее, по формулам определяет напряжения и перемещения и выводит результаты в виде таблицы (см. рис. 2), также программой строятся графики зависимости $\sigma_r^{(k)}, \sigma_\theta^{(k)}, u_r^{(k)}$.

Результаты				
r	r=0.05	r=0.051	r=0.052	r=
$\sigma_r^{(1)}$	0.100000	-0.058694	-0.019748	
$\sigma_r^{(2)}$			-0.019748	-C
$\sigma_r^{(3)}$				
$\sigma_\theta^{(1)}$	2.027473	1.986167	1.947221	
$\sigma_\theta^{(2)}$			0.060762	0.
$\sigma_\theta^{(3)}$				
$u_r^{(1)}$	0.002771	0.002745	0.002722	
$u_r^{(2)}$			0.002722	0.
$u_r^{(3)}$				

Рис. 2. Результаты расчетов

- Можаровский, В.В. Реалізація розрахунку напружень багатословних труб / В.В. Можаровський, Д.С. Кузьменков. // Вісник Київського національного університету імені Т. Шевченка Серія: фізико-математичні науки. — 2015. — № 5. — С. 173—178.

РАЗРАБОТКА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТОЙКИХ К РАЗЛИЧНЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Е.С. Петухова

Институт проблем нефти и газа СО РАН ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск, Россия; evgspar@rambler.ru

Надежность и долговечность изделий и конструкций из полимерных материалов напрямую зависят от условий их эксплуатации. Воздействие климатических факторов проявляется, когда изделия или конструкции эксплуатируются непосредственно на открытом воздухе и снижение эксплуатационных свойств вызвано протеканием процессов старения. К другому типу воздействия факторов климата следует отнести охрупчивание полимерного материала под воздействием низких температур окружающего воздуха, что приводит к увеличению вероятности возникновения морозобоинных трещин при случайном механическом воздействии.

Для повышения морозостойкости полиэтиленовых композиционных материалов использовали 2 пластифицирующие добавки — стеариновую кислоту (СК, ГОСТ 6484-96) и дибутилсебацат (ДБС, ГОСТ 8728-88). Механизм их воздействия на полимерные материалы заключается в снижении внутреннего трения между макромолекулами, что сопровождается повышением эластичности полимера, в том числе при пониженных температурах. В табл. 1 представлены результаты исследования физико-механических характеристик исследованных материалов при комнатной температуре, температуре минус 50 °С, а также их трещиностойкости (коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic}).

Таблица 1. Физико-механические характеристики при минус 50 °С и трещиностойкость пластифицированных композиционных материалов на основе полиэтилена марки ПЭ2НТ11

Композит	σ_t , МПа	ε_p , %	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
ПЭ2НТ11	49,0	53 — более 300*	14,9
+ 1,0 мас.% СК	46,0	32—125	15,2
+ 3,0 мас.% СК	47,7	45—113	17,5
+ 5,0 мас.% СК	48,7	36—224	15,9
+ 1,0 мас.% ДБС	45,8	81 — более 300*	16,7
+ 3,0 мас.% ДБС	44,3	более 300*	16,0
+ 5,0 мас.% ДБС	39,4	более 300*	15,0

Примечание: σ_t — предел текучести; ε_p — удлинение при разрыве; K_{Ic} — критический коэффициент интенсивности напряжений; * — величина ограничена возможностью движения траверса в холодильной камере разрывной машины

Установлено, что введение пластификатора ДБС в матрицу полиэтилена приводит к получению материала с величиной удлинения при разрыве при минус 50 °С до 300% и выше. Кроме того, все исследованные материалы характеризуются более высокой трещиностойкостью по сравнению с исходным полиэтиленом.

Климатическую стойкость к солнечному излучению, в особенности стойкость к ультрафиолето-

вой части спектра, возможно повысить путем введения в полимерный материал стабилизирующих добавок. В работе использовали 3 марки стабилизирующих добавок — СОЗ, СО4 и Стафен (Новосибирский институт органической химии СО РАН). На рис. 1 представлены результаты исследования удлинения при разрыве полиэтилена марки 273-83 и композитов на его основе, содержащих различные стабилизирующие добавки.

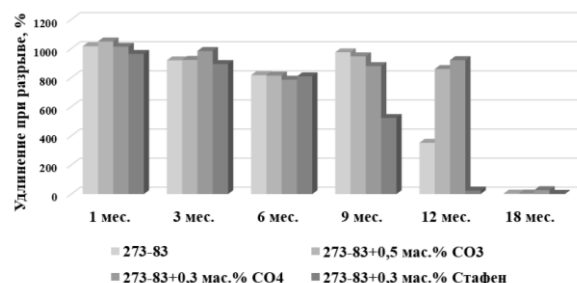


Рис. 1 Зависимость удлинения при разрыве от продолжительности экспонирования композитов на открытом испытательном полигоне

Видно, что после 12 месяцев экспонирования величина исследуемого показателя исходного полиэтилена снижается более чем в 2 раза, а композита, содержащего стабилизатор Стафен составляет 25%. Материалы, стабилизированные СОЗ и СО4, сохраняют свои деформационные характеристики. К 18 месяцам экспонирования все материалы охрупчиваются. Поскольку ресурс работы стабилизаторов ограничен, что вызвано их расходом при прерывании цепных радикальных реакций, для увеличения срока службы изделий на открытом воздухе, концентрацию стабилизаторов следует повышать. Кроме того, эффективным приемом будет являться применение стабилизаторов в сочетании с так называемыми адсорбентами ультрафиолетового излучения, к примеру, техническим углеродом.

Таким образом, показано, что для повышения морозостойкости полиэтилена эффективным приемом является введение различных пластифицирующих добавок. В данной работе выявлена высокая эффективность пластификатора ДБС. Для повышения климатической стойкости полиэтилена к воздействию УФ-излучения, как наиболее вредоносного для полимерных материалов, высокую эффективность показали серосодержащие стабилизаторы марки СОЗ и СО4.

Работа выполнена по Госзаданию 0377-2018-0001.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

В.Ф. Луцко¹, В.В. Рубаник¹, В.С. Лабетский¹, О.В. Кимстач¹, А.А. Казьмин², О.С. Попова¹

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

²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь

Введение. Растущая потребность промышленности и транспорта в материалах, сочетающих в себе высокую прочность и пластичность металла с химической стойкостью и легким весом полимера, привели к необходимости создания многокомпонентных конструкций, в которых металлические и полимерные материалы соединены в гибридную структуру. Для сохранения целостности, а следовательно, и работоспособности таких структур основополагающее значение имеет технология соединения, с помощью которой достигается необходимая прочность соединения между полимерами и металлами. Наиболее часто используемые методы соединения разнородных материалов, такие как механическое крепление и клеевое соединение, имеют ограничения в отношении передаваемой нагрузки между металлом и композитом, а также требуют больших трудовых и временных затрат [1]. В этой связи, представляет несомненный интерес ультразвуковая (УЗ) сварка благодаря низкому энергопотреблению, невысокой температуры в зоне сварки, очень короткому циклу, простоте автоматизации экологической безопасности [2]. В некоторых случаях УЗ сварку можно использовать для соединения несходных материалов, если их композиция совместима. Более того, некоторые термопласты, например, полистирол, лавсан и другие, свариваются только ультразвуком.

Цель работы — исследование эффективности, разработанной в ИТА НАН Беларуси технологии соединения многокомпонентных металлополимерных структур методом УЗ сварки на примере изготовления фильтрующего элемента масляного фильтра, представляющего собой комбинацию полимерный композит — металл — термопласт — металл — полимерный композит.

Материалы и методы. Материалом для исследований служил фильтрующий элемент, широко применяемый в масляных и топливных фильтрах двигателей внутреннего сгорания. Фильтрующий элемент имеет звездообразную складчатую конструкцию, состоящую из двух опорных стальных сеток и расположенной внутри их фильтровальной бумаги. Сетки, сотканые из проволоки диаметром 0,2 мм с размером ячейки 1,5х1,5 мм, осуществляют поддержку складок и фиксируют расстояние между ними. Фильтровальная бумага компании Ahlstrom толщиной 0,8 мм покрыта полимерным композитом, имеющим пористую структуру. Соединение двух концевых секций фильтровального элемента производилось на установке для УЗ сварки термопла-

стов мощностью 1,2 кВт с рабочей частотой 20 кГц [3] по схеме, представленной на рис. 1. В качестве связующего материала использовалась вставка из полипропилена в виде полосы 100х3х0,5 мм. Сила прижима составляла 790 Н и поддерживалась постоянной во время всего сварочного цикла и в течение 1 с после выключения ультразвука. Для прочностных испытаний растяжением из концевых секций вырезались образцы шириной 32 мм и длиной 40 мм. Показатели разрушающего напряжения при одноосном растяжении определяли по ГОСТ 11262–80 на разрывной машине ИП 5158-5 при скорости нагружения 20 мм/мин.

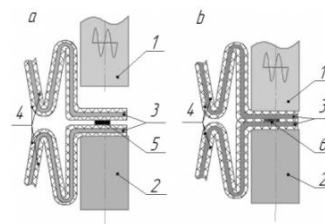


Рис. 1. Схема соединения концевых секций фильтровального элемента: а — до УЗ сварки, б — после УЗ сварки; 1 — излучатель, 2 — ложемент, 3 — фильтровальная бумага, 4 — опорные стальные сетки, 5 — вставка из ПВХ, 6 — гибридное соединение (сварной шов)

Результаты и обсуждение. Установлено, что при неизменных значениях амплитуды колебаний излучателя 35 мкм с увеличением времени УЗ воздействия растет и разрушающая нагрузка гибридного соединения образцов. Ее максимальное значение 135 Н достигается при времени УЗ воздействия равном 1,5 с. Образцы, полученные по существующей технологии склеивания с использованием полиуретанового клея, имели максимальную нагрузку при растяжении 57 Н. Разработанная технология соединения многокомпонентных металлополимерных структур методом УЗ сварки может быть использована и для создания других конструкций различного функционального назначения.

1. AmancioFilho.S. T., Blaga L.A. / Joining of polymer-metal hybrid structures: Principles and applications // John Wiley & Sons, 2018
2. Wagner, G., Balle F., Eifler D. /Ultrasonic Welding of Hybrid Joints. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society // (JOM) — 2012. — Vol. 64, 3, p. 401–406
3. В.В. Рубаник, В.Ф. Луцко, С.Н. Шрубиков, О.С. Попова, Д.Д. Шурмелевич/Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных материалов. ПОЛИКОМТРИБ-2015 // Тезисы докладов международной научно-технической конференции — Гомель: ИММС, НАНБ, 2015. — с. 112

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПИСАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ ПРОНИ НА ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

С.Л. Гавриленко¹, С.Н. Бухаров¹, О.В. Алексенко²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; serega48@mail.ru

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия, vl.aleksenko@mail.ru

Для описания механического поведения полимерных материалов, в том числе композиционных, используется ряд механико-математических моделей, учитывающих временные эффекты и историю деформирования. К достаточно простым относится линейная вязкоупругая модель Прони [1]:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{e_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} \int_0^t K(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau.$$

Здесь $G(\xi) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^G}}$, $K(\xi) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^K}}$,

$$G(0) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i = \mu, \quad K(0) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i = K.$$

Как показано в работе [2], для аттестации этой модели с целью выполнения конечноэлементных расчетов с применением ANSYS и других программных продуктов, можно использовать результаты статических механических испытаний на кратковременную релаксацию (машина Инстрон 5567) и динамического механического анализа (прибор DMA Q 800). В первом случае регистрируется зависимость усилия от времени в условиях релаксации при сжатии, во втором — зависимость модуля накопления и тангенса потерь при фиксированных частотах нагружения в условиях трехточечного или консольного изгиба.

Целью настоящего исследования являлась разработка и апробация алгоритма оценки точности двух вышеуказанных методов аттестации линейной вязкоупругой модели Прони.

В предлагаемом алгоритме использованы аналитические зависимости усилия от времени и параметров модели Прони в испытаниях на релаксацию при сжатии и модуля накопления от частоты нагружения и параметров этой модели. Соответственно, зависимость усилия от времени имеет вид:

$$P(t) = E\varepsilon_0 S_0 \left(1 - \frac{2(1+\nu)}{E} \left(\sum_{i=1}^{n_G} G_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i^G}} \right) \right) \right),$$

а модуль накопления зависит от частоты нагружения и параметров модели Прони следующим образом:

$$G'_1(\omega) = G_\infty + G_1 \frac{\omega^2}{\omega^2 + \frac{1}{\lambda_1^2}}.$$

Для апробации алгоритма проведен ДМА-анализ и испытания на кратковременную релаксацию при сжатии ПКМ на основе СВМПЭ. Результаты ДМА-анализа представлены на Рис. 1.

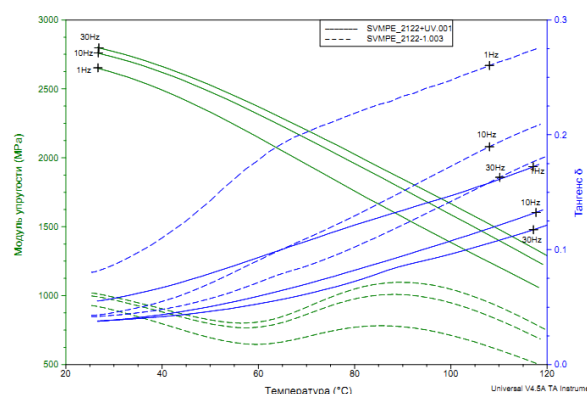


Рис. 1. Зависимости модуля упругости и тангенса потерь для двух материалов. Сплошная линия — 90%-СВМПЭ₂₁₂₂ + 10%-углеволокна 2 мм; Пунктирная — СВМПЭ₂₁₂₂.

На основе приведенных зависимостей и аналитического записи их дифференциала вычисляются модельная и параметрическая относительная погрешности. Полная относительная погрешность метода определяется суммированием:

$$\Delta_{amm} = \Delta_{mod} + \Delta_{par}.$$

Заключение. Апробация предложенного алгоритма при аттестации механических свойств полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена позволила количественно оценить погрешность их реологического описания вышеуказанными методами.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ и РФФИ (проект T18P-286 (№ 18-58-00037_Бел_а)).

1. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости — М.: Мир, 1974. — 340 с.
2. Шилько С.В., Гавриленко С.Л., Панин С.В., Алексенко О.В. Определение реологических параметров полимерных материалов на основе идентификации вязкоупругой модели Прони по результатам статических и динамических испытаний // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 3. — С. 33—38.

УЧЕТ ПОДАТЛИВОСТИ В РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ
В ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯН.Н. Рыбкин¹, Т.В. Рябченко², М.В. Зернин¹¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, nkolai@mks.ru²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, shilko_mpri@mail.ru

Введение. Аналитические методы моделирования контактного взаимодействия тел с круговыми границами, в том числе с учетом неоднородности поверхностных слоев, рассмотрены в обобщающих монографиях [1-3]. Прикладные задачи расчета трибосопряжений сложной формы, учитывающие конструктивные особенности и нелинейность деформирования поверхностных слоев, решаются, как правило, с применением «универсального» конечноэлементного (КЭ) программного обеспечения. Это предполагает большие расходы на приобретение лицензии и высокую квалификацию пользователя. Кроме того, возникают трудности КЭ дискретизации антифрикционных покрытий, толщина которых мала в сравнении с размерами деталей трибосопряжения. В качестве альтернативного решения в Брянском государственном техническом университете разработан программный комплекс BVFEM 2.0. Его применение для анализа гидродинамических процессов в динамически нагруженных подшипниках скольжения (ПС) с антифрикционными покрытиями, в том числе на основе полимерных композиционных материалов, описано в данном сообщении.

Методы исследования. В расчетах использован способ учета контактной податливости вала и втулки подшипников скольжения, основанный на трехмерном КЭ моделировании, предложенный в работе [4]. На рис. 1 дана схема цилиндрического ПС, на которой использованы следующие обозначения: d — диаметр вала; D — диаметр рабочей поверхности подшипника; θ — угловая координата; ω — угловая скорость вращения вала в подшипнике; e_x и e_y — проекции эксцентриситета (удаления центра вала от центра подшипника) на координатные оси; F_x и F_y — проекции нагрузки, действующей на вал.

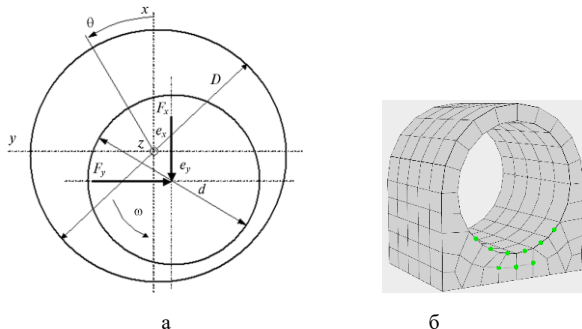


Рис. 1. Схема цилиндрического подшипника скольжения (а) и дискретизация конструкции подшипника квазисовместными конечными элементами (б).

Результаты и их обсуждение. Авторами выпол-

нен КЭ подробный анализ течения смазки в шатунных подшипниках насосной установки УНП55-250. Для учета упругой податливости деталей подшипникового узла вводилась компонента перемещения, учитывающая деформацию контактирующих поверхностей. Для дискретизации был выбран 20-узловой КЭ, в котором добавлены несовместные функции формы третьего порядка по каждой координате. Это обеспечивает высокую точность расчета при очень больших (более 100) соотношениях сторон КЭ и возможность построения экономичных трехмерных моделей подшипников с тонкими слоями антифрикционного материала (рис. 1, б). Интерфейс программы позволяет сравнивать результаты нескольких вариантов расчетов (рис. 2).

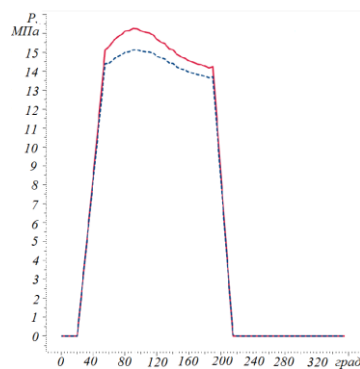


Рис. 2. Максимальные давления в подшипнике с жестким (сплошная линия) и податливым корпусом (пунктир).

Заключение. Представлена методика КЭ расчета цилиндрического подшипника скольжения и изложены возможности разработанного программного обеспечения для моделирования подшипников жидкостного трения. Дана численная оценка значимости фактора радиальной податливости.

Благодарности. Работа выполнена по заданию ПМТ 6.09 и при поддержке БРФФИ (Т18Р-286).

1. Кравчук А.С., Чигарев А.В. Механика контактного взаимодействия тел с круговыми границами. — Мн.: Технопринт. — 2000. — 196 с.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука. — 2001. — 478 с.
3. Чернец М.В., Клименко Л.П., Пашечко М.И., Невчас А. Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии: В 3 т. / Под общ. ред. М.В. Чернеца, Л.П. Клименко. — Т. 1. Механика трибоконтактного взаимодействия при скольжении. — Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы. — 2006. — 476 с.
4. Зернин М.В., Мишин А.В., Рыбкин Н.Н., Шилько С.В., Рябченко Т.В. Учет многозонного гидродинамического трения, перекоса осей и контактной податливости вала и втулки подшипников скольжения // Трение и износ. — 2017. — Т. 38, № 3. — С. 269—279.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ЛЫЖ

С.В. Шилько¹, Т.В. Рябченко¹, Е.М. Петроковец¹, Д.А. Черноус¹, С.Н. Целуева²¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь, shilko_mpr@mail.ru²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

Введение. Современные спортивные лыжи изготавливаются в виде «сэндвича» (рис. 1), в котором относительно тонкие армирующие слои высокомодульного направленно-армированного стеклопластика работают совместно с легким сотовым или микропористым наполнителем (сердечником). Дополнительный вклад в изгибную жесткость и прочность лыжи вносят слой скольжения из антифрикционного полимерного материала и декоративное покрытие. Таким образом, лыжи представляют собой геометрически сложные композитные конструкции с выраженным градиентом механических свойств по толщине. Оптимальный выбор модуля упругости материала и толщины слоев позволяет добиться требуемой изгибной жесткости и, в итоге, улучшить трибологические характеристики лыжи за счет оптимального распределения зон опирания при толчке и последующем скольжении.

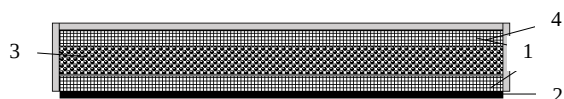


Рис. 1. Поперечное сечение лыжи: 1 — армирующие слои; 2 — слой скольжения; 3 — сердечник; 4 — декоративное покрытие.

Целью работы является оптимизация изгибной жесткости композитной лыжи посредством механических испытаний и механико-математического моделирования.

Методы исследования. Статические механические испытания, аналитические и численные решения задач о трехточечном изгибе слоистых стержней и пластин из изотропных материалов.

Результаты и их обсуждение. Исследование включало испытания на машине Инстрон 5567 лыж известных производителей и модельных призматических образцов «полиэтилен — стеклопластик — пенопласт» на трехточечный изгиб (рис. 2, 3); конечноэлементные расчеты в двумерной и трехмерной постановке, а также аналитическое определение прогиба модельных образцов (таблица).

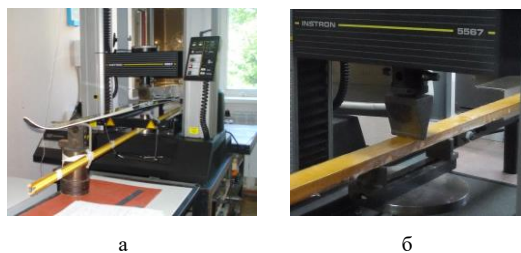


Рис. 2. Определение изгибной жесткости лыжи Fisher LS Combi (а) и модельного образца (б).

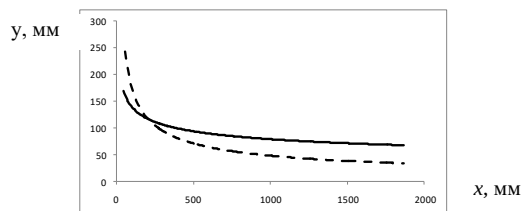


Рис. 3. Профиль лыжи Fisher LS Combi до (сплошная линия) и после приложения нагрузки 230 Н (пунктирная линия).

Вертикальное перемещение в центре трехслойного образца вычисляли по теории изгиба

$$H_{\text{теор}} = \frac{\Delta F}{\Delta u_{\text{max}}} = \frac{48b}{L^3} \left(M_3 - \frac{M_2^2}{M_1} \right), \quad (1)$$

где L — расстояние между опорами; b — ширина образца; M_1, M_2, M_3 — условные моменты:

$$M_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^n E_i (y_i^j - y_{i-1}^j). \quad (2)$$

Здесь i — номер слоя; n — число слоев; E_i — модуль Юнга материала i -ого слоя; y_i — поперечная координата верхней точки i -ого слоя; $y_0 = -h/2$, где h — толщина образца. В левой части уравнения (2) для моментов j — индекс, а в правой — число от 1 до 3.

Таблица. Зависимость прогиба, мм от нагрузки

F, Н	Эксп.	Пл. деформация		Пл. напряж. состояние		3D	Ан. реш.
		1	2	1	2		
1	2,5	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,1
2	5,0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,4	4,2
3	7,5	6,3	6,3	6,4	6,3	6,5	6,3
4	10,0	8,3	8,3	8,5	8,5	8,7	8,4
5	12,5	10,4	10,4	10,6	10,6	10,9	10,5
6	14,2	12,5	12,5	12,7	12,7	13,1	12,6

Э — эксперимент, 1 — сосредоточенная сила, 2 — учет контактных деформаций.

Установлено, что предположения о плоской деформации или напряженном состоянии, а также изотропии армирующих слоев приводят к завышенной оценке изгибной жесткости. Так, экспериментальному значению изгибной жесткости модельного образца «полиэтилен — стеклопластик — пенопласт» $H_{\text{экс}} = 0,4$ Н/мм соответствует расчетное значение $H_{\text{теор}} = 0,443$ Н/мм, найденное по формуле (1).

Заключение. Для расчета изгибной жесткости композитных спортивных лыж необходимо использовать 3D моделирование реальной геометрической формы лыжи с учетом анизотропии армирующих слоев.

Благодарности. Работа выполнена по заданию ПМТ 6.09 и при поддержке БРФФИ (Т18КОРГ-004).

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ЭРИТРОЦИТОВ ПРИ НАСЛЕДСТВЕННОМ СФЕРОЦИТОЗЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АСМ-КАРТ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

М.Н. Стародубцева^{1,3}, И.Е. Стародубцев², Ю.С. Харин²,
Е.Ф. Мицура¹, И.А. Челнокова³, М.С. Абрамович², Н.И. Егоренков¹

¹Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; yegorenkov-n@mail.ru

²Белорусский государственный университет, Гомель, Беларусь,

³Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является уникальным методом для исследования поверхности биологических клеток, включая их фрикционные свойства. Она позволяет получать информацию не только о рельефе и физико-механических свойствах (локальных значениях) наномасштабных областей, но и о распределении локальных значений на микромасштабных участках (свойствах их карт), а также о средних значениях и их статистических характеристиках на этих участках. Количественный анализ АСМ-карт поверхности клеток является важнейшей задачей при исследовании клеток. В качестве обобщающей характеристики рельефа поверхности клеток предложена фрактальная размерность (D_F) [1]. Однако попытки использовать её для количественной характеристики трёхмерных (XYZ) АСМ-карт их физико-механических свойств, включая силы трения, наталкиваются на принципиальную трудность — не совпадающую с размерностями по осям XY (длина) размерность по оси Z (сила) и возникающую при этом неопределенность в масштабировании силы по оси Z. Её можно преодолеть, анализируя зависимость D_F от коэффициента масштабирования (t) по оси Z [2]. С помощью этого метода можно получать информацию о структуре карт [3]. Кроме статистического и фрактального анализов карт свойств поверхности клеток для их характеристики можно использовать спектральный анализ (на основе дискретного Фурье преобразования).

Цель работы — изучение механических свойств поверхности эритроцитов, совершенствование методов оценки АСМ-карт поверхности клеток, используя фрактальный, спектральный и статистический методы анализа, и, соответственно, классификации типов клеток на их основе (на примере дискоидной и сфероидной форм эритроцитов пациентов с наследственным сфероцитозом).

Материалы и методы. АСМ-исследования химически фиксированных и высушенных препаратов клеток проводили на «НТ-206» («Микротестмашины», Беларусь) с использованием CSC38 (сканирование) и NSC-11 (индентирование) зондов («MicroMash») на воздухе. Значения сил трения ($F_{тр}$) определяли как полуразность значений латеральных сил, полученных при прямом и обратном сканировании. Оценивали средние значения $F_{тр}$ и модуля упругости (E), а также шероховатость карт механи-

ческих свойств (R_q). Для анализа данных использовали программы «SurfaceXplorer 1.3.11» и STATISTICA, а также разработанный авторами программный комплекс.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что зависимости $D_F=f(t)$ для АСМ-карт поверхности дискоцитов и сфероцитов как и для карт ранее изученных фибробластов и эпителиальных клеток характеризуются наличием экстремумов, параметры которых связаны с гетерогенностью структуры поверхности клеток (наличием различных по размеру образований). Показано, что в сравнении с дискоцитами структура поверхностного слоя сфероцитов более однородна, а значения E и $F_{тр}$ являются более высокими. При проведении спектрального анализа АСМ-карт каждая линия сканирования рассматривалась как реализация случайной последовательности и для нее применялось дискретное преобразование Фурье. После сглаживания по полученным картам спектральных оценок строили информативные характеристики (медианы значений спектрограмм для каждой частоты) и по ним проводили статистическую классификацию типов эритроцитов (дискоциты, сфероциты) методами «деревья решений» и «бустинг на деревьях решений». Найден частотный интервал (соответствующий усредненным размерам структурных образований, характерным для каждого типа клеток) с наилучшей точностью классификации (более 80% для метода «бустинг на деревьях решений»).

Заключение. Используя фрактальный, спектральный и статистический анализы, изучены структурно-механические свойства поверхности эритроцитов пациентов с наследственным сфероцитозом и разработаны подходы, позволяющие на основе анализа АСМ-карт поверхностей клеток классифицировать различные их типы.

1. Кузнецова, Т.Г. Способ исследования цитоскелета нативных эритроцитов : пат. 12868 Респ. Беларусь, МПК G 01N 13/10 (2009) / Т.Г. Кузнецова, М.Н. Стародубцева, Н.И. Егоренков; дата публ. 28.02.2010.
2. Starodubtseva, M.N. Novel fractal characteristic of atomic force microscopy images / M.N. Starodubtseva, I.E. Starodubtsev, E.G. Starodubtsev // Micron. — 2017. — Vol. 96. — P. 96—102.
3. Nano- and microscale mechanical properties of erythrocytes in hereditary spherocytosis / M.N. Starodubtseva, E.F. Mitsura, I.E. Starodubtsev, I.A. Chelnokova, N.I. Yegorenkov, L.I. Volkova, Y. S. Kharin. // J. Biomech. — 2019. — Vol. 83. — P. 1—8.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВП.А. Витязь^{1,2}, М.Л. Хейфец¹, В.Т. Сеньют², А.Г. Колмаков³, С.А. Клименко⁴¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия⁴Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

Переход от метастабильных к неравновесным процессам при физико-химическом анализе диаграмм состояния и соответствующим им комплексным топологическим моделям позволяет определить возможность и вероятность фазовых переходов и превращений структур, а также механизмы их реализации. Для изучения неравновесных процессов формирования материалов и покрытий изделия на макро-, 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; совместимости — изучением возможных путей эволюции системы.

Цель работы — на основе физико-химического анализа фазовых диаграмм наноструктурных материалов рассмотреть термодинамические условия образования алмазоподобных материалов и покрытий, а также возможность и вероятность различных механизмов их синтеза в неравновесных условиях.

Сравнение размеров кристаллитов сверхтвердого материала с его фрактальными характеристиками для наноструктурных поликристаллов, синтезированных из очищенных порошков алмаза показывает, что рост кристаллитов алмаза существенно зависит от давления только при высоких температурах (>2000 °C), тогда как фрактальные характеристики в большей степени зависят от давления.

Это свидетельствует о том, что синтез наноструктурного материала помимо роста кристаллитов, определяющегося температурой, сопровождается многоуровневым ветвлением их границ. Данный процесс может быть обусловлен дроблением наноразмерных алмазных кластеров при повышении давления термобарической обработки.

Адаптация структуры материала к внешним термобарическим воздействиям происходит без деградации и разрушения. В основном адаптация проявляется в упругопластической области при высоких температурах и относительно невысоких давлениях, сопровождая начало процесса графитизации.

Анализируя результаты мультифрактальной параметризации и критические показатели способности структуры покрытий к адаптации можно сказать, что материал, для которого имеют место большие величины показателей механических свойств, в

частности твердости, характеризуется наивысшими значениями фрактальной размерности и наименьшими значениями показателей степени упорядоченности и меры однородности структуры. Для такого материала также характерна наибольшая способность адаптироваться к внешнему нагружению.

Сравнение размеров, как формирующихся кристаллитов, так и поликристаллических частиц, с фрактальными характеристиками материала синтезированного из порошков алмаза с неалмазными формами углерода на поверхности частиц показывает, что сделать окончательный вывод можно только после усреднения размеров структурных составляющих в двух подсистемах (наноразмерных кристаллитов и поликристаллических частиц на их основе). В результате установлено, что при относительно невысоких температурах (<1700 °C) происходит превалирование значений температуры в процессах роста структурных составляющих, а наиболее существенное влияние на фрактальные характеристики рассматриваемых структур обеспечивает давление. Оптимальные области фрактальных характеристик, обеспечивающие максимальные физико-механические характеристики материала, для спекленного из порошка алмазных частиц с неалмазными формами углерода на поверхности, соответствуют температурам (~ 2000 °C), и при высоких давлениях (7—8 ГПа) практически не связаны с процессом графитизации.

Адаптация структуры материала к внешним воздействиям также происходит без деградации и разрушения. Проявляется она в основном тоже в упругопластической области. Однако, адаптация наиболее заметна при относительно низкой температуре и высоком давлении, и связана с фазовым превращением неалмазных форм углерода в алмаз.

Заключение. Таким образом, показано, что синтез наноструктурных материалов из наноразмерных порошков алмаза в зависимости от состояния поверхности частиц может происходить как по диффузионному механизму, так и путем, более подобным каталитическому, за счет перестройки микрорегруппировок графита в алмазную структуру.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта T16P-176).

ПОГЛОТИТЕЛИ МИКРОВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СЛОЕВ

И.В. Семченко¹, А.Л. Самофалов¹, В.А. Банний², Е.Н. Волнянко³

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; isemchenko@gsu.by

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; bannyi@tut.by

³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

За последние десятилетия значительно возрос интерес к исследованию и созданию композиционных искусственных сред — метаматериалов, обладающих магнито-электрическими свойствами в СВЧ-диапазоне [1, 2]. Метаматериалы — это системы, состоящие из микрорезонаторов, обладающие электромагнитными свойствами, управлять которыми можно, варьируя параметры системы. Исследования метаматериалов представляют как фундаментальный интерес, так и открывают широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления ближним электромагнитным полем, включая новые типы электромагнитных сенсоров, компактные антенны, линзы с субволновым разрешением, объекты, скрытые в определенном диапазоне частот и др.

Цель работы состоит в установлении закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона с метаматериалами, состоящими из омега-элементов классической и прямоугольной формы, учёте влияния металлополимерного полидисперсного слоя и разработке одностороннего и двустороннего «идеального» поглотителя СВЧ волн на основе таких структур.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования выбраны метаповерхности, представляющие собой упорядоченные специальным образом в пространстве двумерные массивы частиц (омега-элементов), размеры которых много меньше длины волны возбуждающего излучения, а также металлополимерные полидисперсные слои. В качестве базового связующего композиционных полидисперсных слоев выбран полиэтилен высокой плотности (ПЭ, ГОСТ 16338–77), как это сделано в работе [3]. Экспериментальные листовые образцы поглотителей будут изготовлены методом термического прессования порошкообразных смесей ПЭ с магнитными (карбонильное железо (ТУ 6-09-300-78), никель (ГОСТ 9722–78), магнитно-мягкий феррит (ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС) и комбинированными (технический углерод и феррит) [3].

Методы исследования — аналитические расчёты, численное моделирование, радиофизические исследования с использованием безэховой камеры и векторного анализатора при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность образцов в диапазоне частот от 0,3 до 6 ГГц.

Результаты и их обсуждение. В работе решена граничная задача для структуры, состоящей из

метаматериала, содержащего омега-элементы прямоугольной формы и металлополимерного полидисперсного слоя, обладающего значительным поглощением и выполняющего роль подложки. Посредством численного моделирования проведено сравнение двух вариантов омега-резонаторов, имеющих квадратную либо прямоугольную форму. Предложено использовать данные омега-частицы в качестве элементов метаматериала, обладающего сильным поглощением и одновременно слабым отражением СВЧ волн. С применением компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов и аналитического подхода для определения поляризуемостей электрически малых резонаторов произвольной формы смоделирован метаматериал, содержащий сбалансированные в СВЧ-диапазоне омега-резонаторы. Проведен систематический анализ свойств отражения, прохождения и поглощения предложенного метаматериала для ТЕ и ТМ поляризаций падающих СВЧ волн и установлены оптимальные значения межэлементного расстояния и периода элементарной ячейки метаматериала. Проведено исследование поглощающих свойств металлополимерного полидисперсного слоя в зависимости от параметров функционального наполнителя (ФН) и дана оценка влияния содержания ФН на радиофизические характеристики композиционных материалов на основе полимеров.

Результаты исследований вносят вклад в область создания средств защиты биологических объектов, радио- и электронной аппаратуры от ЭМИ СВЧ-диапазона.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № Ф18КИ-028 от 25.01.2018 г.

1. I.V. Semchenko [et al.] Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality // Journal of Applied Physics. — 2017 (121), 015108-1 — 015108-8
2. Цянь Сонгсонг, Банний В.А., Самофалов А.Л., Семченко И.В., Хахомов С.А. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур // Проблемы физики, математики и техники. — 2014, № 4, 40—45
3. Банний В.А., Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Физико-химические и технологические особенности формирования полимерных композитных радиопоглощающих материалов // Материаловедение. — 2007, № 6, 17—24

УГЛЕВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ИМПЛАНТАТЫ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЯГКИХ И КОСТНЫХ ТКАНЕЙ

В.И. Дубкова¹, А.П. Малецкий², А.В. Глинник³, Н.М. Бигун⁴, О.И. Маевская¹

¹НП ООО «МЕДБИОТЕХ», г. Минск, Беларусь, e-mail: dubkovav52@gmail.com

¹Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

²Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В.П. Филатова НАМН Украины, Одесса, Украина

³Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

⁴Львовская областная клиническая больница, Львов, Украина

В настоящее время наблюдается тенденция роста травматизма, врожденных дефектов и тяжелых заболеваний. Поэтому поиск методов оперативного лечения врожденных и приобретенных пороков живого организма является одной из ключевых проблем современности, заключающаяся в замене сложнейшей биологической материи синтетическими полимерными имплантатами, с помощью которых возможно восстановление анатомической формы, функции органов и физиологических систем организма.

В Институте общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси совместно с Белорусским государственным медицинским университетом и Институтом глазных болезней и тканевой терапии им. В.П. Филатова Академии медицинских наук Украины разработаны углеволокнистые композиционные имплантаты (УВКИ), предназначенные для замещения костных и мягких тканей при реконструктивно-восстановительных операциях в челюстно-лицевой хирургии и офтальмологии (рис. 1). УВКИ по характеристикам приближаются к биофизическим свойствам мягких тканей тела здорового человека, не обладают склонностью к резорбции, прочны, с одной стороны, и моделируемы, с другой; легко режутся, что позволяет корректировать форму имплантата во время операции, легко и доступно вводятся в область дефектов мягких тканей и фиксируются. Волокнистая структура УВКИ является матрицей для развития и дальнейшего созревания соединительнотканых элементов, прорастающих между волокнами имплантатов, обеспечивая формирование и приращение мягкотканного массива с сохранением первоначально отмоделированной формы его контуров [1, 2].

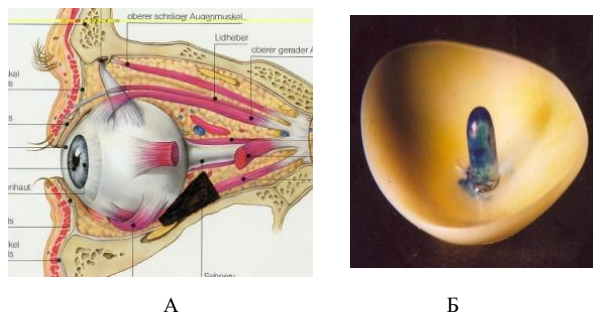


Рис. 1. Углеволокнистый композиционный имплантат в форме клина между сломанной стеной орбиты и глазным яблоком (А) и глазной протез со шпорой из УВКИ (Б)

Показания к применению в челюстно-лицевой хирургии: дефекты мягких тканей челюстно-лицевой области врожденного и приобретенного характера (после перенесенной травмы, после удаления опухолей мягких тканей); костные полости, образовавшиеся после удаления доброкачественных опухолей или опухолеподобных образований челюстей; костные дефекты, образовавшиеся после удаления ретинированных и дистопированных зубов.

Выпуск УВКИ осуществляет организация НП ООО «МЕДБИОТЕХ», являющаяся одним из ведущих производителей изделий медицинского назначения в Республике Беларусь.

1. Бегун Н.М., Вит В.В., Малецкий А.П., Дубкова В.И. Особенности реакции мягких тканей орбиты, окулоорбитального участка и костных структур на имплантацию полимерно-композиционного материала и политетрафторэтилена в экспериментальных исследованиях. Офтальмологический журнал. 2017. № 6 (479). С. 57–64 ISSN 0030-0675
2. Дубкова В.И., Маевская О. И., Глинник А. В., Чудаков О. П. Полимерно-композиционные имплантаты «Иквобан» при реконструктивно-восстановительных операциях в челюстно-лицевой хирургии // Весті НАН Беларусі. Сер. мед. навук.— 2010.— № 1.— С. 68—77.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ВЫСШИМИ КАРБОНОВЫМИ КИСЛОТАМИ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭФФЕКТЫ

Т.П. Дьячкова¹, А.И. Кондаков¹, И.В. Гутник¹, А.Г. Ткачев¹,
Н.В. Усольцева², А.И. Смирнова², С.Ю. Купреенко³, М.А. Шилов⁴

¹Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия; dyachkova_tp@mail.ru

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия

Углеродные нанотрубки (УНТ), характеризующиеся комплексом уникальных физико-механических характеристик, являются перспективным компонентом композиций с улучшенными триботехническими показателями. Для усиления взаимодействия УНТ с модифицируемыми матрицами (полимеры, растворители) применяют различные способы функционализации. В результате формирования на поверхности которой удастся достичь более равномерного диспергирования нанотрубок и снижения их расходных норм для достижения необходимых эффектов.

В настоящем исследовании углеродные нанотрубки с коническими и цилиндрическими графеновыми слоями подвергали функционализации посредством взаимодействия с высшими карбоновыми кислотами (олеиновой, пальмитиновой, стеариновой). Оценивалось влияние предварительного окисления УНТ с целью формирования гидроксильных групп, температурных условий взаимодействия исходных и окисленных нанотрубок с карбоновыми кислотами на эффективность осаждения модифицирующего слоя (по приросту массы образцов). Кроме того, функционализированные УНТ исследовались методами электронной микроскопии, ИК-Фурье и рамановской спектроскопии, ТГ/ДСК-анализа. Посредством визуальной оценки, анализа микрофотографий, а также на основании данных об оптической плотности определялась седиментационно-агрегативная устойчивость толуольных и масляных дисперсий исходных и функционализированных УНТ и размеры частиц дисперсной фазы в них. Были проведены предварительные испытания эффективности использования УНТ в составе шинных резин.

Установлено, что предварительное окисление поверхности УНТ в отличие от обработки соляной кислотой с целью удаления примесей металлоксидных частиц, способствует некоторому увеличению содержания карбоновых кислот в функционализированных образцах. Наиболее равномерное покрытие на поверхности нанотрубок (рис. 1) формируется при содержании стеариновой кислоты, равном 10-11 мас. %.

Отмечается однородное диспергирование функционализированных УНТ в толуоле со снижением средних размеров агломератов на порядок и более по сравнению с суспензиями, содержащими исходные УНТ. Композиции на основе индустри-

ального масла И-20А с 0,1-0,2%-ным содержанием функционализированных УНТ демонстрируют седиментационно-агрегативную устойчивость в течение не менее 6 месяцев.

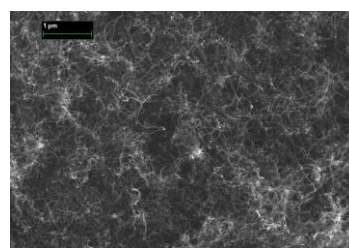


Рис. 1. СЭМ-изображение функционализированных стеариновой кислотой УНТ

Функционализированные стеариновой кислотой УНТ в отличие от исходных при стандартном способе введения достаточно равномерно распределяются и по массиву резины. Показатели, полученные для резиновых композитов при исследовании зависимости условного напряжения от деформации при скорости растяжения 500 мм/мин представлены в табл. 1. Наблюдается повышение прочности на 12% и снижение относительного гистерезиса на такую же величину. При коррекции рецептуры и отработке режимов введения нанотрубок в резиновую смесь можно ожидать и более высоких результатов.

Таблица 1. Физико-механические свойства резины, содержащей функционализированные стеариновой кислотой УНТ

Показатель	Концентрация ф-УНТ, мас. %			
	0	0,25	0,50	1,00
Условная прочность, МПа	17	18,6	19,0	18,7
Отн. удлинение, %	251	312	313	292
Отн. гистерезис	0,0558	0,0495	0,0554	0,0643

Следовательно, функционализация высшими карбоновыми кислотами протекает эффективно и способствует усилению взаимодействия углеродных нанотрубок с неполярными матрицами и растворителями, что оказывает влияние на физико-механические показатели композиционных материалов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-19150 мк).

МЕХАНИКА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая, Д.А. Федотов

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; vasilevich.bntu@mail.ru

Цель. Материалы и методы. Вследствие больших размеров для макромолекул характерны определенные особенности в релаксационных свойствах. Релаксационные процессы — это процессы перехода системы из неравновесного в равновесное состояние, которые протекают во времени при воздействии на систему силового поля. Релаксационные явления обусловлены перестройкой структуры, которая осуществляется тепловыми движениями цепей, движениями отдельных атомных групп в цепи, а также элементов надмолекулярной структуры. В полимерах эти явления подобны релаксации в любых других телах, но из-за длинноцепочечного строения макромолекул в полимерах они протекают в широких временных диапазонах, что делает их легко доступными для наблюдения. Несмотря на то, что любой процесс протекает во времени, явление релаксации может быть обнаружено лишь тогда, когда время наблюдения за процессом больше времени релаксации.

Деформация полимера может вызывать в нем сложную перегруппировку цепных молекул, связанную с преодолением сил взаимодействия между ними. Экспериментальные исследования показывают, что с течением времени возникающее напряжение уменьшается. Падение напряжения указывает на то, что макромолекулы, выведенные из равновесных положений в момент деформации, переходят к новым состояниям равновесия не сразу, а постепенно. Перегруппировка макромолекул зависит от их молекулярного веса и конфигурации и не может происходить мгновенно, а требует определенного времени. Восстановление равновесия в системе, выведенной из этого состояния внешними причинами, называется релаксацией, а изменение напряжения от времени при установившейся деформации называется релаксацией напряжения.

В сетчатых полимерах (включая эпоксидные) процесс релаксации напряжения подразделяется на три основные стадии. На первой, очень быстрой, стадии релаксация напряжения вызвана движением и ориентацией сегментов макромолекул. Это движение происходит настолько быстро, что среднее время релаксации лежит в пределах 10^{-4} — 10^{-6} с. На второй, менее быстрой, в пределах 10^2 — 10^4 с релаксация обусловлена перегруппировкой элементов надмолекулярной структуры на всех уровнях. На третьей, самой медленной стадии, релаксация связана с химическими процессами (химическая релаксация). Химическая релаксация продолжается 10^7 — 10^9 с. Однако, энергия активации релаксационного процесса одинакова во всех трех случаях, так как она связана с энергией межмолекулярного взаимодействия в полимерах.

Известно, что надмолекулярная структура некристаллических полимеров, в том числе полимеров в незаполимеризованном или частично заполимеризованном виде, состоит из сетки химических полимерных связей, сетей, образованных Ван-дер-Ваальсовыми поперечными связями для областей молекулярной упорядоченности (пачки, микропачки, микроблоки).

Чтобы понять влияние релаксации на свойства полимеров, рассмотрим процесс течения обычной жидкости. При достаточно высокой температуре сила молекулярного взаимодействия мала, благодаря чему время перегруппировки молекул при течении жидкости очень мало ($(10^{-10}$ — $10^{-8})$ с; практически мгновенно). При понижении температуры время перегруппировки молекул возрастает — жидкость, в частности незаполимеризованное связующее, густеет. При низких температурах, если полимер не закристаллизуется, время релаксации перегруппировки молекул настолько велико, что полимер будет проявлять свойства твердого тела, оказываясь в стеклообразном состоянии (битумы, смолы, связующие в момент полимеризации). Из изложенного следует, что время релаксации перегруппировки молекул, подобно вязкости жидкости, определяется соотношением энергии межмолекулярного взаимодействия и энергии теплового движения молекул.

Для того, чтобы полимер мог реализовать свою гибкость, должно быть оптимальное соотношение времени релаксации и времени воздействия внешней силы. Чем дольше действует сила, тем больше деформация, тем меньше модуль, тем «мягче» полимер. Если деформация осуществляется с большой скоростью, то времени для развития высокоэластической деформации будет недостаточно и полимер может вести себя так, словно он находится в стеклообразном состоянии, т.е. не проявлять свою гибкость. В этом случае деформирующие силы уравниваются силами межмолекулярного взаимодействия и упругость полимера соответствует упругости обычного твердого тела. Только при достаточно большом времени воздействия внешней силы (малой скорости или малой частоты) у полимера есть возможность реализовать свою гибкость. **Таким образом,** механические свойства зависят как от химической природы полимера, так и от продолжительности действия силы. Весь комплекс механических свойств полимеров определяется соотношением между временем релаксации (t) и временем действия силы (t_l), которое называется критерием Деборы: $D = t/t_l$. Чем меньше критерий Деборы, тем быстрее релаксирует система, тем она более податлива.

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ ПО КРИТЕРИЮ ДЕБОРЫ

Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая, К.Г. Скворцов

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; vasilevich.bntu@mail.ru

Цель. Материалы и методы. Механические свойства полимеров могут быть оценены соотношением между временем релаксации (t) и временем действия силы (t_1), которое называется критерием Деборы: $D=t/t_1$. Очень малое значение D характерно для низкомолекулярных жидкостей. Если, однако, деформирующая сила действует на полимер в течение очень длительного времени, то значение D окажется небольшим даже для очень большого времени релаксации и полимер проявит текучесть. В силу этой причины ряд типичных эластомеров в невулканизированном состоянии текут при хранении. Таким образом, при малом D полимеры обнаруживают свойства жидкостей, при большом — твердых тел.

Переход к стеклообразному состоянию полимеров сопровождается некоторым увеличением расстояния между атомами и распрямлением углов в молекуле. Такое положение сопровождается во время релаксации развитием упругой деформации под действием приложенной нагрузки. Время релаксации процесса развития деформации в этом случае относительно небольшое, так как развиваемые деформации малы (2 — 8%). Устранение деформирующей нагрузки практически моментально приводит к восстановлению исходного состояния и размеров тела. Под действием напряжений, кроме упругой деформации, происходит выпрямление участков — сегментов макромолекул без того, чтобы молекула в целом переместилась в новое положение. Устранение деформирующей силы приводит к обратному скручиванию молекул и восстановлению размеров тела. Поведение линейного полимерного тела в таких условиях соответствует высокоэластичному состоянию полимера [1—5].

В момент приложения нагрузки мгновенно возникает упругая деформация. Высокоэластичная деформация развивается постепенно, так как при этом происходит распрямление и раскручивание молекулярных звеньев макромолекул, т.е. процесс, который не может произойти мгновенно.

Равновесное состояние характеризуется тем, что изменение размеров прекращается. Начиная с этого момента и до снятия нагрузки, полная деформация будет равна сумме упругой и высокоэластичной деформаций.

После снятия напряжения упругая деформация исчезает мгновенно, а эластичная постепенно. Через определенное время размеры полимера возвращаются к исходным размерам.

В диапазоне температур, в котором проявляются эластичные свойства полимера, равновесное значение эластичной деформации почти не зависит от

температуры; температура влияет лишь на скорость достижения равновесия. Для проявления высокоэластической деформации необходимы два условия: 1) наличие цепных молекул достаточно большой гибкости; 2) высокая скорость изменения их формы.

Большой термодинамической гибкостью обладают полимерные материалы (реактопласты) такие как полиизопрен, полибутадиен, полиизобутилен, а также термопласты на стадии полимеризации, к тому же скорость деформации у них достаточно велика. Поэтому при обычной температуре у этих полимеров хорошо выражены высокоэластические свойства. По мере увеличения частоты сеток при полимеризации равновесная высокоэластическая деформация уменьшается. Образование большого числа поперечных связей приводит к получению твердого материала, не способного к высокоэластической деформации, в результате чего повышаются упругие свойства и прочность полимера. Необходимо также отметить, что высокоэластическая деформация связана с изменением объема полимера и является обратимой.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Незаполимеризованное связующее одновременно обладает некоторыми свойствами жидкости и твердого упругого тела.

2. Способность к перемещению частей молекул (атомов, звеньев, групп звеньев) и макромолекул в целом позволяет рассматривать связующее как тело, обладающее текучестью как у обычной жидкости. При этом давление сжатия связующего в любом направлении одинаково.

3. Деформация незаполимеризованного связующего состоит из двух частей — упругой, которая мгновенно изменяется с изменением напряжения; и так называемой высокоэластичной, которая развивается в течение некоторого времени. Деформации обоих видов являются вполне обратимыми.

1. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. — М.: Изд. «Наука», 1966. — 370 с.
2. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. — М.: Изд. «Химия», 1968. — 536с.
3. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах / Том 2. Под ред. И.А. Биргера. М.: Изд. «Машиностроение», 1968. С. 215 — 225.
4. Василевич Ю.В., Механика препрегов — расчет изделий из армированных композиционных материалов //Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко С.В., Сахоненко В.М., Малиютин Е.В. / в 2 частях БНТУ, 593с., 2016.
5. Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко А.В., Сахоненко С.В., Скворцов К.Г., Федотов Д.А. Применение свойств препрегов в технологических процессах изготовления изделий из композиционных материалов — М.: РАН, 2017 — 154 с.

PROGRESSIVE TECHNOLOGY RESOURCE AND ENERGY CONSERVATION AT MANUFACTURING OF PRODUCTS FROM RECYCLED MATERIALS

R.M. Dolinskaya, N.R. Prokopchuk

Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus; raisa_dolinskaya@mail.ru

Relevance of the work due to the fact that the use of waste rubber industry in the main production is the best option in solving numerous measures to save raw materials and environmental protection, and work in this direction is promising.

Objective: To study was the possibility of creating polymer composites based on waste rubber industry.

Methods: rotational viscometer, vibration rheometry, mechanical properties (elastic and strength properties, tear strength, abrasion resistance and abrasion soptivlenie, Shore A hardness).

Results: Rubber crumb rubber is one of the processing products of secondary raw rubber (rubber waste, including old tires). The main raw material for production of rubber crumb is worn out tires, as more than half of the rubber produced in the world is used in the manufacture of tires. Shredded tires as crumb are widely used

Rubber crumb rubber is one of the processing products of secondary raw rubber (rubber waste, including old tires).

The main raw material for production of rubber crumb is worn out tires, as more than half of the rubber produced in the world is used in the manufacture of tires.

Shredded tires as crumb are widely used in various fields, especially as an adequate supplement to fresh rubber compounds.

The fine rubber crumb retains the elastic and the strength properties of the starting material to the maximum extent. The compositions containing crumb rubber, represent a dispersion type "polymer resin".

The use of crumb rubber of this fraction allows to obtain elastomeric compound having good physical mechanical properties. Sample number 3 has the best properties. A wide variety of rubber products for different

in various fields, especially as an adequate supplement to fresh rubber compounds. The fine rubber crumb retains the elastic and the strength properties of the starting material to the maximum extent. The compositions containing crumb rubber, represent a dispersion type "polymer resin". Rubber crumb rubber is one of the processing products of secondary raw rubber (rubber waste, including old tires). The main raw material for production of rubber crumb is worn out tires, as more than half of the rubber produced in the world is used in the manufacture of tires. Shredded tires as crumb are widely used in various fields, especially as an adequate supplement to fresh rubber compounds. The fine rubber crumb retains the elastic and the strength properties of the starting material to the maximum extent. The compositions containing crumb rubber, represent a dispersion type "polymer resin"

purposes can be produced on the basis of these composites. The investigation of the crumb size effect on the the deformation properties of the composites showed that the use of larger particles results in a substantial reduction in elongation at break as compared with smaller particles (table).

The reason for the negative impact of large size particles on the deformation properties of composite materials, is probably insufficient strength of connections in the system "polymer — polymer"; and that is probably adsorption of plasticizers and softeners occurs on the surface of large crumbs that in turn, negatively affects the properties of the polymeric material.

conducted a study on the possibility of cheaper polymer compositions due to full or partial exclusion of their composition rubber, t. E. Realized the possibility of manufacturing polymer compositions based on waste rubber industry.

Table. Recipes of elastomeric compositions using rubber crumb

Names of Parts	Samples, the mass fractions of 100 mass fractions of rubber				
	1	2	3	4	5
Rubber	225,5	225,5	225,5	225,5	225,5
Rubber crushed (fraction 0,2—1,0 mm) / (fraction 1,0—2,0 mm) / (fraction 2,5—4,0 mm)	90,0	100,0	110,0	120,0	130,0
Physical and mechanical properties of the compositions					
Tensile strength, MPa	1,8/1,6/1,4	2,1/1,8/1,58	2,7/2,4/2,1	2,3/2,1/1,7	2,2/1,9/1,6
Shore A hardness, units Shore A	70/70/60	75/75/64	80/80/68	80/80/68	80/80/68

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСИСТЕМ

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

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

Методики расчета коэффициента трения и износостойкости основаны на знании физико-механических свойств контактирующих материалов деталей. В тоже время традиционные методы определения этих свойств предполагают изготовление специальных образцов, вырезанных из готовых деталей, и последующее их испытание. Очевидно, что это приводит к частичному или полному разрушению детали и такие методы не пригодны при необходимости стопроцентного контроля деталей или при их малых размерах. Кроме того, для решения задач триботехники требуется определять физико-механические свойства материала, как правило, на сопрягаемых поверхностях деталей.

Цель. Определение физико-механических свойств рабочей поверхности детали без её разрушения.

Материалы и методы. Предлагаемые методы предназначены для стальных металлоизделий, однако они справедливы и для ряда цветных металлов и сплавов. Эти методы основаны на закономерностях упругопластического внедрения сферического индентора в поверхность исследуемого материала детали. При определении модуля нормальной упругости использована известная зависимость Г. Герца для упругого первоначально точечного контакта, в которую внесена специальная поправка, учитывающая наличие упругопластической деформации исследуемого материала при внедрении индентора. Определение прочностных и пластических свойств материала методом индентирования базируется на деформационной теории пластичности [1], согласно которой при неизменных внешних условиях независимо от вида напряженно-деформированного состояния для данного материала справедлива единая кривая деформирования, описывающая связь интенсивности напряженного состояния σ_i материала с интенсивностью его деформированного состояния ε_i . На этой основе функциональную связь σ_i от ε_i можно получить, например, как при испытании образцов на растяжение, так и при внедрении индентора. Следует отметить, что в ряде работ (например, [2]) указано, что опыты не в полной мере подтверждают существование единой кривой деформирования. В связи с этим, выполненное нами специальное экспериментальное исследование действительно показало, что при одинаковых значениях интенсивно-

сти деформаций в центре упругопластического контакта сферического индентора и относительной деформации при растяжении образца величины интенсивности напряжений в контакте меньше, чем истинные напряжения при растяжении. Для совпадения указанных напряжений предложен поправочный коэффициент, величина которого зависит от уровня пластической твердости [3] исследуемого материала.

Результаты и их обсуждение. Указанные выше подходы позволили разработать неразрушающие методы определения различных физико-механических свойств материалов сопрягаемых поверхностей деталей по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора. Так, предложены методы определения модуля нормальной упругости [4], предела текучести [5] и временного сопротивления [6]. Предложен также неразрушающий метод [7] определения истинного сопротивления разрыву углеродистых и легированных конструкционных сталей по величине истинного давления на поверхности отпечатка сферического индентора под нагрузкой, а также неразрушающая методика определения относительного сужения после разрыва.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 19-08-00049 и 19-48-340002) и в рамках конкурса стипендии Президента РФ-2018 (СП-253.2018.1).

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение. — 1975. — 399 с.
2. Пашков, П.О. Разрыв металлов — Л.: Судпромгиз. — 1960, — 244 с.
3. ГОСТ 18835-73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. — Введ. 01.07.75.
4. А.с. 1147951 СССР, МКИ⁴ G01N3/40 Способ определения физико-механических свойств материалов/М.С. Дрозд, М.М. Матлин. Оpubл. 30.03.95. Бюл. №12.
5. Патент 2086947 Российская Федерация, МКИ⁶ G01N 3/00. Способ определения предела текучести материалов / Ю.И. Славский, М.М. Матлин — Оpubл. 10.08.1997. Бюл. № 22.
6. Патент 2011182 Российская Федерация, МКИ⁵ G01 N3/40 Способ определения предела прочности материала / Ю.И. Славский, М.М. Матлин — Оpubл. 10.08.1994. Бюл. № 7.
7. Патент 2011182 Российская Федерация, Пат. 2680111 РФ, МПК G01N3/42. Способ определения истинного сопротивления разрыву/М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин. Оpubл. 15.02.2019. Бюл. № 5.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГЕТЕРОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ

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

Национальный Политехнический Университет, Ереван, Армения; ars.karapetyan56@mail.ru

Цель

Изучение процессов механической релаксации позволяет качественно оценить влияние структурных превращений на свойства гетероцепных полимеров в процессе их наполнения модифицированными армянскими наполнителями [1–4]. Настоящая работа посвящена изучению особенностей деформационно-прочностных свойств гетероцепных полимеров, наполненных минеральными наполнителями, модифицированных фторсодержащим олигомером — фторалканом.

Материалы и методы

Композиты на полимерной основе (сополимер формальдегида, полиамид и полифениленоксид) были наполнены термообработанными и модифицированными фторалканом местными минеральными наполнителями (травертин, мрамор, бентонит). Испытания проводились при постоянных относительных деформациях растяжения (1,2 и 4%) со скоростью 1,25...5 К/мин в достаточно широком температурном диапазоне 298...433 К.

Кинетику образования сшитой структуры в процессе формирования материалов исследовали методами золь-гель и дилатометрического анализов. Исследование релаксации напряжения исходных и наполненных гетероцепных полимеров проводилось в условиях одноосного растяжения с помощью микрорелаксометра РП-1. Базовая длина образцов составляла 10 мм. Деформационные, прочностные и дилатометрические свойства материалов в условиях теплового воздействия исследовались методом термомеханического анализа (ТМА) на установке УИП-70М.

Результаты и их обсуждение

Исследованием механической релаксации модифицированных гетероцепных полимеров в области малых деформаций ($\epsilon = 1...4\%$) установлена концентрационная зависимость величины напряжений и релаксационного модуля, а также отмечено повышение в 1,5...2 раза упругих свойств по сравнению с исходными полимерами, что обусловлено наличием межмолекулярной химической сшивки.

Полученные результаты ТМА свидетельствуют о существенных изменениях деформационного поведения гетероцепных полимеров в зависимости от степени наполнения. Для исходных материалов получена типичная для аморфно-кристаллических по-

лимеров зависимость ТМА, характеризующаяся переходом в область плавления кристаллической фазы от упругого деформирования к вязкому течению под нагрузкой. Наличие в образцах композитов сетчатой структуры обуславливает появление области высокоэластического деформирования на кривой ТМА в виде почти горизонтальной площадки, температурные пределы и расположение которой зависят от количества введенного наполнителя. С увеличением степени наполнения более 5 вес.% наблюдается изменение характера деформируемости, что выражается сдвигом области высокоэластических деформаций постепенно в сторону более высоких температур.

Результаты дилатометрических исследований показали, что коэффициент линейного теплового расширения α наполненных полимеров имеет соответственно величину $8...13 \cdot 10^{-5}$ и $6...11 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, которые слабо изменяются в широком температурном интервале 313...433 К. Дальнейшее повышение температуры приводит к возрастанию α исходных полимеров, сопровождающееся началом плавления кристаллической фазы.

Заключение

Структурная перестройка в гетероцепных полимерах в процессе их модифицирования наполнителями существенным образом влияет на деформационное поведение и прочностные характеристики полученных композитов. Методом ТМА установлено появление температурной области высокоэластического деформирования наполненных полимеров при содержании 5...40 вес.% наполнителя, что обусловлено наличием межмолекулярной частично-сшитой структурой.

1. Pogolian A.K., Karapetyan A.N., Hovhannisyan K.V. Study of Physico-Chemical Modification of Heterochained Polymers with Armenian Minerals // Tribologia — 2004, N 1, 63—73
2. Pogolian A., Bahadur S., Hovhannisyan K. and Karapetyan A. Investigation of the tribochemical and Physico-mechanical Processes in Sliding of Mineral-filled formaldehyde Copolymer Composites Against Steel // Wear. — 2006 (260), 662—668
3. Погосян А.К., Карапетян А.Н., Оганесян К.В. Физико-химическое модифицирование антифрикционных полимеров минералами // Тр. междунар. науч.-техн. конф.: Машиностроительные технологии и техника автоматизации. — Ер. — 2012, 230—234
4. Меликсетян Н.Г., Карапетян А.Н., Сароян В.В., Оганесян К.В. Основные закономерности трения и изнашивания композиционных материалов и смазочных масел // Вестник научно-технического развития, 2016 (105), N 5, 27—42

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Banys J.	18, 19	Абрамович М.С.	248
Barčík Štefan	161	Агабеков В.Е.	204
Borodich F.M.	57, 59	Агбалян С.Г.	229
Dolinskaya R.M.	255	Адериха В.Н.	24, 169
Franek F.	5	Акопова О.Б.	234
Ganachaud F.	94	Акулова В.М.	47, 147
Gohs U.	241	Алексеев А.Г.	88
Grytsenko K.	28	Алексеев Н.А.	62
Gumbytė M.	158	Алексенко О.В.	245
Ivanov L.	28	Алиева А.Г.	48
Janiak C.	40	Алиева Д.Н.	44
Jankauskas V.	158	Алисин В.В.	155, 180
Jansen C.	40	Аллаяров С.Р.	15
Kazlauskas D.	158	Алыев А.Т.	45, 144
Koleda Peter	161	Антусёва А.В.	90
Kozhushko V.V.	23	Асланова Э.Т.	146
Ksianzou V.	28	Астрашаб Е.В.	215
Kuzhir P.	18	Афанасьева Е.С.	224
Kuznetsov V.	19	Ахвердиев К.С.	76
Kuznetsova T.A.	67	Ахмедов Э.Н.	41
Lapitskaya V.A.	67	Ахмедова Р.А.	44
Lelis M.	158	Ахметов Т.А.	199, 232
Lupicka O.	67	Бабаханова М.А.	200
Lytvyn P.	28	Бабаханова М.Г.	99
Maciejewski I.	67	Бабич В.Е.	181
Macutkevic J.	18, 19	Бабодей В.Н.	148
Mäder E.	241	Базлова Т.А.	219
Meisak D.	18	Байрамова И.В.	33
Moseenkov S.	19	Балков В.В.	164
Padgurskas J.	6, 179	Банный В.А.	250
Pankov V.V.	40	Бардушкин В.В.	182
Pepelyshev A.	57	Басинюк В.Л.	183, 184
Perepelkin N.V.	59	Баулин Д.А.	220
Prokopchuk N.R.	255	Бахшалиев В.И.	216
Rukanskis M.	6, 179	Башлакова А.Л.	97, 129
Schrader S.	28	Бекишева А.А.	217
Sergienko V.P.	23	Беликов А.И.	164
Shenderova O.	19	Белясова Н.А.	92
Shutava T.G.	40	Берёзина Е.В.	173
Slominskii Yu.	28	Бигун Н.М.	251
Volskis D.	6	Бирюков В.П.	219, 220
Zhandarov S.	241	Білик Ю.М.	233
Абдурахманова М.А.	48	Бобкова А.Я.	164
Абед Н.С.	98	Бобкова Е.Ю.	35
Аборкин А.В.	106, 188	Богдан Е.О.	138

Богданов А.Л.	29, 177	Гракович П.Н.	88, 130
Богданович С.П.	38, 39	Грачек В.И.	42
Бойко А.А.	100, 105	Григорчик А.Н.	215
Бойко М.В.	175	Григорьев А.Я.	70, 128, 176, 187, 214
Бокарёв Д.В.	106	Григорьев Ф.А.	71, 72, 186
Болотов А.Н.	230	Гринчук П.С.	193
Борисова Р.В.	83	Гринюк Е.В.	13, 34, 49
Брыкова А.Н.	149	Громыко Г.Ф.	191
Бугаенко В.В.	211	Громыко Ж.Н.	101
Буйткенов Д.Б.	37	Гудушаури Э.Г.	219
Буковский П.О.	185	Гулвердашвили Ц.Д.	43
Бурков А.А.	174	Гулиев А.М.	27, 41, 151, 152
Буря А.И.	136, 221	Гулиев К.Г.	43, 51
Бутовская Г.В.	50, 92	Гулиев Р.Р.	44
Бухаров С.Н.	176, 245	Гулиев Т.Д.	41
Буяновский И.А.	156, 171	Гулиева Т.М.	144
Бышов Н.В.	172	Гулямов Г.	98
Вархолински Б.	168, 192	Гунько В.М.	139
Василевич Ю.В.	242, 253, 254	Гутник И.В.	252
Василевская Ю.В.	34	Гуцев Д.М.	70, 187
Василенко В.В.	76	Давыдов А.А.	31, 116
Василенко И.В.	94	Давыдова О.В.	105
Васильев А.П.	88	Даровской Г.В.	222
Васильева А.С.	93, 109	Деркач А.Д.	190
Васильева В.С.	35, 143	Джавадов М.Я.	7
Верещагин М.Н.	236	Джанахмедов А.Х.	7
Винидиктова Н.С.	32, 101, 102	Джафаров Р.В.	46, 51
Витязь П.А.	249	Джилавдари И.З.	65
Вишневский К.В.	137	Дихтярук Е.В.	139
Волкотруб Р.Е.	183, 184	Дмитриев Н.Н.	64
Волнянко Е.Н.	103, 250	Добруховска Е.	192
Волощик Н.А.	138	Добыш В.А.	92
Воробьёва Е.В.	103	Дробышевская Н.Е.	105
Выдумчик С.В.	143	Дубкова В.И.	251
Гавриленко О.О.	143	Дубодел В.П.	119
Гавриленко С.Л.	245	Дубровский В.В.	24
Гавриш В.М.	221	Духович Ю.В.	138
Гаджиева С.Д.	48	Дьячкова Т.П.	173, 174, 252
Гапанькова Е.И.	17, 96	Егоренков Н.И.	248
Гвоздев А.А.	173, 174	Едимечева И.П.	140
Герасименко С.А.	104	Езупова М.Н.	222
Гетикова М.А.	66	Елкин А.И.	106, 188
Гилевич А.	168, 192	Елманов А.М.	222
Глинник А.В.	251	Ерёмина Е.А.	136
Глоба А.И.	138	Ермаков С.Ф.	114, 178
Головнева Н.А.	140	Ермолович О.А.	101
Голубева Е.А.	242	Ефимчик К.В.	101
Гольдаде В.А.	30, 32	Жандаров С.Ф.	93
Гончар А.Н.	149	Жарин А.Л.	36
Горбачук Н.И.	223	Железина Г.Ф.	160
Горошков М.В.	74	Жилинский В.В.	161
Горячева И.Г.	214	Жовлиев С.С.	123

Жорник В.И.	189	Кожевникова Г.В.	68, 69
Жукалов В.И.	32, 132	Козлов Н.Г.	17, 96
Замковец А.Д.	47, 194	Колбая В.Г.	84
Запольский А.В.	189	Колесников В.И.	163, 182
Зеленская М.Н.	166	Колесников И.В.	175
Зернин М.В.	58, 246	Колмаков А.Г.	209, 249
Зиновкин Д.А.	114	Комаров А.И.	223
Злотников И.И.	107, 127	Конакова О.В.	102
Золотая П.С.	223	Кондаков А.И.	252
Зотов С.В.	32, 128, 190	Копченков В.Г.	73
Зыкова А.В.	201	Костюк С.В.	94
Иванников А.Ю.	165	Котлярова А.Б.	139
Иванов Л.Ф.	133	Котов Д.А.	194
Ивахник А.В.	189	Кравцов А.Г.	32
Ивахник В.П.	189	Красневский Л.Г.	63
Игнатович Ж.В.	16, 115	Краснов А.П.	74, 231
Ильмалиев Ж.Б.	217	Криваль Д.В.	20, 21
Ильющенко А.Ф.	62, 191	Кривогуз Ю.М.	10, 27
Исаков В.В.	220	Кривошея Ю.В.	211
Исакович О.И.	42	Круль Л.П.	13, 34, 92, 140
Исмаил И.А.	216	Крутько Э.Т.	137
Ищенко Н.Я.	45, 144, 151, 152	Ксенофонтов М.А.	35, 143
Кабат О.С.	190	Кудина Е.Ф.	90, 110
Кадолич Ж.В.	32	Кудрицкий В.Г.	29, 70
Казанкин В.А.	256	Кудрявский Д.Л.	49, 50
Казанкина Е.Н.	256	Кудян С.Г.	126
Казьмин А.А.	244	Кузей А.М.	181
Калда Г.С.	60	Кузнецова Т.А.	168, 192, 193, 194, 201
Калинин Л.А.	133	Кузнецова Ю.С.	39
Калиниченко С.В.	136	Кузьменков Д.С.	242
Карапетян А.Н.	257	Кузьминский Ю.Г.	111
Карпенко К.И.	206	Кулагина Г.С.	160
Каршиев М.	108	Кулешов А.К.	161
Касперович А.В.	137	Кулиев А.М.	45, 144
Кахраманов Н.Т.	14, 33	Купреенко С.Ю.	252
Каюшников С.И.	38	Курбанова Н.И.	45, 144
Кенесбеков А.Б.	86	Курбанова Р.В.	14
Кенжалиев Б.К.	217	Курской В.С.	233
Кимстач О.В.	244	Кухта Т.Н.	145
Кириллина Д.Ю.	224	Лабецкий В.С.	244
Клабукова Л.Ф.	231	Лавров И.В.	182
Клименко С.А.	209, 249	Лагунова Е.О.	75
Климовцова И.А.	52, 140, 141, 142	Лазарева Н.Н.	83, 224
Клюев А.Ю.	17, 96	Лазарчик М.В.	167
Кобец А.С.	190	Лапицкая В.А.	168, 193, 194
Ковалева И.Н.	71, 72, 197, 214, 235	Ласковнев А.П.	128, 187
Коваленко М.А.	30	Ласминская М.В.	13, 49
Коваль В.Н.	26	Латышевич И.А.	17, 96
Коваль И.В.	129	Лаукканен С.	202
Коваль Л.И.	178	Лебедев В.Я.	195
Ковенский А.Е.	183, 184	Леванцевич М.А.	79
Коврига В.В.	84, 85, 109	Левиев Л.В.	225

Левченко В.А.	156, 171	Можаровский В.В.	242
Лейзеронк Г.Н.	38	Мозгунова А.И.	256
Леонов А.Ю.	227	Морозов А.В.	159
Лешок А.В.	62, 167, 191	Мукутадзе М.А.	76
Ливонович К.С.	91	Муравьева Т.И.	213
Литвинова Е.Э.	221	Муржинский Д.	192
Лобкова М.П.	183	Мясников Ф.В.	206
Лугинова У.Р.	89	Мясникова Н.А.	206
Лук'янюк М.В.	233	Назаралиев Х.Г.	48
Луцко В.Ф.	244	Назаров А.Н.	165, 166
Любимов А.Г.	92	Назаров Е.А.	13
Люштык А.Ю.	38	Назарович А.Н.	20
Маевская О.И.	251	Напреев Р.С.	125
Макаренко В.М.	130	Насриддинов А.Ш.	99
Макаренко О.А.	27, 152	Наумкин А.В.	74
Макарова Ж.Е.	196	Нгуен Тан Бин	147
Макеев В.В.	226	Нгуен Трон Тин	147
Малахов О.В.	210	Неволин В.Н.	203, 205
Малахова В.В.	210	Негматов Ж.Н.	112, 134
Маленко П.И.	227	Негматов С.С.	135
Малецкий А.П.	251	Негматова К.С.	112, 134, 200
Мамедалиева Ф.М.	146	Негматова М.Н.	113
Мамедли С.Б.	46	Неумержицкая Е.Ю.	253, 254
Мамедов Б.А.	44, 146	Никифоров Л.А.	83
Манукян Г.Г.	196	Николаев В.И.	114
Маркова М.А.	207	Ничипорук Ю.Н.	139
Марковская Л.А.	149	Новик Х.А.	16, 115
Мартынюк А.В.	150	Новиков А.В.	165, 166
Марченко Л.Н.	71, 72	Новиков В.В.	230
Матвеев В.Н.	156	Новиков В.П.	169, 223
Матвейко Н.П.	148	Новиков Е.С.	206
Матковский А.К.	139	Новикова О.О.	230
Матлин М.М.	256	Носко А.Л.	77
Маулит А.	86	Овчинников К.В.	116, 190
Маховская Ю.Ю.	197	Оганесян К.В.	257
Мацука Н.П.	191	Олександренко В.П.	150
Мезрин А.М.	157, 212	Опарин И.В.	165, 166
Мекид С.	65	Опацких А.Н.	76
Меликсетян Г.Н.	229	Осенин Ю.И.	210, 211
Меликсетян Н.Г.	228, 229	Островская Л.Е.	35
Мельник М.А.	198	Охлопкова А.А.	83, 88, 202, 224
Мельников С.Ф.	124, 125	Охлопкова Т.А.	83
Мельникова Г.Б.	47, 147, 194, 201	Павлюкевич Т.Г.	143
Меринов В.К.	199, 232	Паентко В.В.	139
Мигаль Ю.Ф.	163	Паникин А.Е.	188
Микитевич В.А.	36	Панин С.В.	9
Миронов В.Г.	217	Панова М.О.	231
Михайлов К.М.	100	Пантелеев К.В.	36
Михайлов М.И.	100	Пантюхов О.Е.	119
Михаловский И.С.	148	Пап О.Г.	52
Михневич А.С.	117	Папина С.С.	184
Мицура Е.Ф.	248	Паренаго О.П.	8

Парфенов А.С.	173	Самусенко В.Д.	156, 171
Пашаев А.М.	7	Сароян В.В.	257
Песецкий С.С.	10, 24, 25, 26, 38	Сатторов А.Р.	122, 123
Петрова П.Н.	87	Сафонов В.И.	201
Петровская А.С.	201	Сафронов Е.В.	77
Петроковец Е.М.	64, 247	Сачек Б.Я.	157
Петухова Е.С.	87, 243	Свердлов Р.Л.	13, 50
Пименов Д.Ю.	78	Селькин В.П.	117, 118
Платов С.И.	79	Семченко И.В.	250
Плескачевский Ю.М.	9	Сенатрев А.Н.	199, 232
Подгорная В.В.	71, 72	Сенють В.Т.	249
Подденежный Е.Н.	105	Сенють Н.М.	209
Подобед Д.Л.	116	Сергиенко В.П.	176
Поликарпов А.П.	42	Симдянкин А.А.	172
Понарядов В.В.	35	Скаковский Е.Д.	50
Попов А.Н.	66	Скворцов К.Г.	254
Попова О.С.	244	Слепцова С.А.	83, 88, 202, 224
Прожега М.В.	164, 165, 166	Слюсарев М.Н.	172
Прокопчук Н.Р.	53, 145, 225	Смирнов Н.И.	164, 166
Прудников М.И.	162	Смирнов Н.Н.	164, 166
Пчельникова А.В.	148	Смирнова А.И.	173, 174, 252
Рагимова С.К.	45	Снежков В.В.	133
Радюк А.Н.	120	Соколан Ю.С.	60
Радюкевич Д.Л.	147	Соловей Д.А.	193
Рамазанов Г.А.	41	Соловьев А.А.	203, 205
Расулова Ш.Н.	113	Соловьев М.Л.	125
Рахадиллов Б.К.	37	Соловьева В.А.	231
Рева О.В.	20, 21	Соломевич Е.О.	34
Резникова Л.Г.	13	Соломянский А.Е.	204
Релмасира К.Д.	227	Старжинский В.Е.	239
Рзаев Р.М.	51	Стародубцев И.Е.	248
Ризнооккая Н.Н.	65	Стародубцева М.Н.	248
Робота Л.П.	149	Степанова О.А.	37
Роговой А.Н.	62, 167	Стерехов О.С.	118
Рожкова Н.Н.	173, 174, 223	Стечишин М.С.	150, 233
Романов Р.И.	203, 205	Строгонова С.С.	25, 26
Романченко Е.А.	231	Стручкова Т.С.	88
Рощин М.Н.	155, 180	Султанов С.У.	200
Рубаник В.В.	79, 244	Сырейщикова Н.В.	78
Рудак П.В.	161	Сычев А.А.	182
Рухля В.А.	52	Сычев А.П.	175, 182
Рыбкин Н.Н.	246	Тагиев Д.Б.	43
Рябкова В.В.	188	Тарасевич В.А.	92
Рябченко Т.В.	246, 247	Тарасова П.Н.	202
Сабирова О.Ш.	122	Тартаковский З.Л.	126
Савельев Ю.В.	149	Телегин И.А.	234
Савилов С.В.	173	Терентьев В.В.	234
Сагдолдина Ж.Б.	37, 86	Терентьев Д.В.	79
Садыгова А.И.	43	Тимофеев А.А.	116, 119, 120
Салазкин С.Н.	74	Тимошенко А.В.	178
Саламов А.А.	216	Ткачев А.Г.	252
Самофалов А.Л.	250	Ткачев В.И.	126

Толстомятов Е.М.	15	Черноус Д.А.	95, 247
Томина А.-М.В.	221	Чесноков А.В.	210, 211
Торская Е.В.	235	Чижик С.А.	47, 147, 168, 193, 194, 201
Травинская Т.В.	149	Чикачев Э.В.	87
Тулейко А.С.	121	Чмыхова Т.Г.	178
Тухлиев Г.А.	99	Чупрынский С.А.	143
Тучковская А.В.	52, 141, 142	Чхетиани П.Д.	80
Туякбаев Б.Т.	86	Шабловский В.О.	52, 141, 142
Тычинская Л.Ю.	50, 189	Шаповалов А.В.	124
Тютюма В.Д.	61	Шаповалов В.А.	24, 169
Улам-Оргих Д.	22	Шаповалов В.М.	102, 105, 107, 125, 126, 127, 128
Улмасов Т.У.	122, 123	Шапошникова В.В.	74
Упорова А.В.	117	Шахаб С.Н.	16
Усова В.Н.	38, 39	Шахназарли Р.З.	151, 152
Усольцева Н.В.	173, 174, 252	Шевеля В.В.	60
Успенский И.А.	172	Шевлик Н.В.	25
Федоренко А.А.	92	Шелестова В.А.	129, 130
Федоров А.Л.	89, 207	Шилагарди Г.	22
Федорова Т.Г.	208	Шилов Г.Т.	217
Федотов А.Ю.	220	Шилов М.А.	174, 252
Федотов Д.А.	253	Шилько И.С.	66, 131
Филатова О.С.	22	Шилько С.В.	9, 240, 247
Филиппович Л.Н.	16, 115	Шкалей И.В.	212
Фомина Е.К.	49, 50	Шпилевский Э.М.	22
Фоминский В.Ю.	203, 205	Шумская В.Ю.	132, 133
Фоминский Д.В.	203, 205	Шундалов М.Б.	35
Фомихина И.В.	167	Шункевич А.А.	42
Францкевич А.В.	196	Шутова Е.А.	119
Хамедова У.А.	51	Шутова Т.Г.	91
Харин Ю.С.	248	Щербакова О.О.	212, 213
Хейфец М.Л.	209, 249	Щербина Л.А.	25
Хомяков С.Э.	164	Эгамбердиев Б.Ш.	134
Хорьков К.С.	106	Эминов А.М.	108
Хрущов М.М.	170	Эминов Ш.О.	98
Целуев М.Ю.	236	Юсупбеков А.Х.	135
Целуева С.Н.	236, 247	Яблонская Е.И.	53
Цуканов И.Ю.	157	Якименко О.В.	49
Чаевский В.В.	161	Яковенко А.А.	214
Чебурова А.В.	164	Яковлев В.Б.	182
Челнокова И.А.	248		
Чернец М.В.	239		

Электронное
научное издание

Международная научно-техническая конференция
«ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ»
(ПОЛИКОМТРИБ–2019)

Тезисы докладов

Ответственные за выпуск:
И.Н. Ковалёва, С.М. Мартыненко, В.В. Терехов



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



ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон: +375 (232) 34 17 12;
Факс: +375 (232) 34 17 11
mpri@mail.ru
<http://mpri.org.by>