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

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

IX Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Гомель
20-22 октября 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (НАНОМАТЕРИАЛЫ, ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ, ПОКРЫТИЯ И ДР.)

Антонова Е.Л., Сыцко В.Е., Грошев И.М. ……..…..…….……**8-9**
Технологии увеличения уровня повторного использования полимерных отходов

Березянко И.А., Макаревич М.И., Гапоник Л.В., Никишев П.А. …..……..…..…**10-11**
Синтез и исследование механических свойств термоэластопласта поли (стирол-блок-изобутилен-блок-стирол)

Брундуков А.С., Шилько И.С. ……..……**11-13**
Сравнение деформационно-прочностных характеристик при сжатии стеклонаполненных полимерных композиционных материалов на основе полиэфирэфиркетона и полиамида 66

Будник В.С., Гога У.Е., Волынец М.А., Позняк А.А...……..……...……..…**13-15**
Оптические и структурные свойства гибридных органо-неорганических перовскитов, сформированных в среде диметилформамида и диметилсульфоксида

Веремей И.С., Ковалева С.А. ……...…….……**15-17**
Механохимический синтез гетерофазных Fe–Zr–O наполнителей для радиопоглощающих композитов на основе СВМПЭ

Волынец М.А., Гога У.Е., Позняк А.А.……..…….....…**17-19**
Синтез электропроводящей углеродной пасты на основе полианилина и ХСЛ, и временная стабилизация электропроводности

Герман С.А., Тишкевич Д.И., Роткович А.А., Зубеня А.А. ……...……..…**19-21**
Влияние времени высокоэнергетической обработки на дисперсность порошка вольфрама тательными растворами «NO_3^- - SO_4^{2-} - $H_2PO_4^-$»

Гога У.Е., Будник В.С., Позняк А.А. …….……**21-23**
Оптические и морфологические особенности полимер-перовскитных композитов

Греков И.А.…… ……...……..……....**23-25**
Фазовый состав магнетита из окалины после термобарического синтеза

Игнатович Я.С., Соломянский А.Е.……..……...…….…...…**25-27**
Защитные покрытия на основе гидролизованных гексадецилтриметоксисилана и октадецилтрихлорсилана

Карсакова М.В., Шилько И.С. …….……**27-29**
Исследование электрических и механических характеристик армированного углеродными волокнами сверхвысокомолекулярного полиэтилена

Коваленко М.А. ……...……..**29-31**
Методика формирования тонкостенных композиционных волокнисто-пористых систем

Коротченя М.А…….……...……**31-33**
Исследование морфлогии и химического состава АПУ покрытий, полученных методом электронноактивируемого осаждения из газовой фазы

Котельникова А.Н, Роткович А.А., Зубеня А.А., Герман С.А., Федькин В.А., Андрейчик Н.Е., Зубарь Т.И.……..…….…….…….……**33-35**
Синтез композитов на основе градиентных и многослойных нанопроволок NiFeCu в матрицах пористого анодного оксида алюминия

Котельникова А.Н, Роткович А.А., Зубеня А.А., Герман С.А., Федькин В.А., Андрейчик Н.Е., Зубарь Т.И.……..…….…...**35-37**
Управление градиентом состава многослойных плёнок NiFeCu методом потенциодинамического электроосаждения

Крол А.А., Зверев Ф.А., Перевозников С.С.……...……**37-39**
Радиопоглощающие свойства электрохимически осажденных покрытий Ni–P в диапазоне 25–37,5 ГГЦ
Кузьмицкая А.С., Кравченко В.М., Малютина-Бронская В.В.……..……**39-41**
Электропроводящий оксид ITO для применения в оптоэлектронных устройствах
Ломоносов И.А. ……....…….……**41-43**
Экструзионное компаундирование вторичных термопластов: перспективы целевого рециклинга
Меринов В.К.……...…….……**43-45**
Влияние пыли газоочисток на физико-механические характеристики полимерных композитов
Никишев П.А., Шарайчук А.Д., Хорецкий М.С., Гапоник Л.В.……..……...…**45-46**
Особенности электроинициируемой катионной полимеризации виниловых эфиров на примере изобутилового эфира
Останин В.А., Латышевич И.А., Данильчик Е.С., Герман Н.А. ……...…….**46-48**
Композитные материалы на основе отходов кожевенных и деревообрабатывающих производств
Павлова Н.А., Шевчик С.В., Кустанович А.А., Мотевич И.Г., Стрекаль Н.Д.....**48-51**
Фазовый перенос и штарковский отклик катионных CdSe/ZnS квантовых точек, стабилизированных цистеамином
Поливенок Е.Д., Плиско Т.В., Бурть Е.С., Бильдюкевич А.В. …….……...…**51-53**
Влияние добавки полиэтиленимина различной молекулярной массы в осадительную ванну на свойства ультра- и нанофильтрационных мембран на основе полифениленсульфона
Роткович А.А., Чернышева Я.О., Зубеня А.А., Герман С.А., Котельникова А.Н., Труханов А.В., Дашкевич А.С., Тишкевич Д.И. ……..……..……..……**53-55**
Характеристика микроструктуры композиционных материалов компаунд-W
Сапсалёв Д.В., Мельникова Г.Б., Шрубок М.Д., Чижик С.А.…….……**55-56**
Спин-коатинг покрытия на основе смесей полимеровс наночастицами оксида меди (II)
Селицкий Р.А. ……...…….……**56-57**
Керамические связки для высокоскоростного абразивного инструмента из электрокорунда
Степанюк А.А., Плиско Т.В., Бильдюкевич А.В. ……...…..……..……**57-59**
Повышение селективности композиционных нанофильтрационных мембран при разделении смесей магния и лития путем модификации полиэлектролитами
Тычинская И.Д., Комякевич О.Ю. ……..……....…..……**59-61**
Исследование поверхности углеситалла при лезвийной обработке и полировке
Ходосовская О.Ю., Бобарикин Ю.Л.……....……..……**61-63**
Стальная высокоуглеродистая проволока для изготовления металлокорда: проблемы пластичности и пути их решения
Чепцова А.Р., Бриштен А.М., Новицкая В.И., Кудлаш А.Н., Лапко К.Н.……..**63-65**
Термостойкие теплоизолирующие композиты на основе твердого фосфатного связующего и полых микросфер
Чижов И.В., Комаров Ф.Ф., Константинов С.В., Зайков В.А.……..……..……**65-67**
Нанотвёрдость TiAlCuN, TiAlCuCN формируемых реактивным магнетронным распылением
Чикуёнок Д.В., Гилевская К.С. ……..……...…….……**67-69**
Синтез конъюгатов хитозан-салициловая кислот

Секция 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н., Тычинская И.Д.……...……...…...…**70-71**
Фазовый состав тонких пластин монокристаллического сапфира

Ахметова Э.М., Буляков Б.Р., Шарафетдинов Д.И., Салихов Х.М., Стоянов Н.Д., Молчанов С.С., Малинин Ю.Г., Дулов Е.Н., Салахов М.Х., Тагиров Л.Р. ..…….……**72-73**
Цифровой оптико-электронный сенсор метана: принцип, температурная коррекция и применение

Брель Д.В., Стратанович В.А., Гарбарук В.Ю.……...……..…….……**74-75**
Поровая структура однослойных волокнисто-пористых систем

Брель Д.В., Стратанович В.А., Гарбарук В.Ю. ……..……**75-76**
Поровая структура многослойных металл-полимерных волокнисто-пористых систем

Булич Д.Д., Королько С.Н., Конаков А.О., Мальтанова А.М., Пешкова А.А., Позняк С.К., Зиньковская И.И. ……..……..…**77-79**
Оценка накопления наночастиц серебра в тканях растений методом нейтронно-активационного анализа

Буляков Б.Р., Янилкин И.В., Петров А.В., Юсупов Р.В., Гумаров А.И., Рогов А.М., Ахметова Э.М., Ямщикова В.А., Шарафетдинов Д.И., Салихов Х.М., Стоянов Н.Д., Тагиров Л.Р. ……..……**79-81**
Кинетика оптического отклика тонких плёнок палладия различной морфологии при их взаимодействии с водородом

Гарбарук В.Ю.……..…**81-83**
Исследование смачиваемости единичных волокон из смеси полифениленсульфида и полипропилена

Доста В.А.……..…….....**83-85**
Численное исследование наведённого поглощения излучения в нанокомпозите с красителем при различной длительности импульсов излучения

Жданов Э.Р., Олейник А.В., Конищук И.И...……..……..….....**85-86**
Цифровая аттестация детали из полимерного композиционного материала на основе цифрового двойника

Жданов Э.Р., Червяков Л.М., Гранкин В.М.…….…….....**86-88**
Цифровой паспорт детали из полимерного композиционного материала на основе её цифрового двойника

Жолнерчик В.В., Бирюк В.А.……..……..…….....**88-90**
Современные методы исследований пожаровзрывоопасных свойств промышленных пылей

Лабецкий А.Г., Петрова Е.Г., Рогачев А.А.……..……..…….....**90-92**
Композитные газовые сенсоры на основе полипиррола и каолина

Максимюк А.А., Бибик Н.В.…….…..…..….**92-94**
Современные методы исследования структурно-фазовых превращений в стали 40Х при различных режимах закалки

Сазанков А.П., Орешкевич Е.Г.……..……..**94-96**
Применение (возможности) цифрового анализа изображений для определения длины усталостной трещины при циклическом растяжении полимерных образцов

Свирид Н.М., Гульпа Д.Ю., Кузьмар И.И.……...…….....**97-98**
Кинетика нестационарного электроосаждения из многокомпонентного сульфатного электролита

Стратанович В.А., Шилько И.С., Брель Д.В., Довнар А.И.……...……..…...**99-101**
О возможности применения полимерного композиционного материала «Суперфлувис» для краниальных имплантов

Стратанович В.А., Брель Д.В., Михалко А.М.…….…….…….…...**101-103**

Синтез и свойства покрытий, сформированных в разрядной плазме пониженного давления в среде октафторциклобутана
Тулейко А.С., Бухаров С.Н.……..…….....**103-105**
Экспериментальное исследование звукопоглощения композитов на основе гречневой шелухи и модифицированной эпоксидной смолы
Усова В.Н., Кривогуз Ю.М.…….…….....**105-106**
Прочностные характеристики полиамида 6, модифицированного добавками алифатического поликетона
Фомихина И.В., Бирюк В.А., Кислицкий В.В.……**106-108**
Исследование изменений структуры и свойств металлоконструкций из сталей различных классов в нефтехимических производствах
Хаинская Е.В., Гилевская К.С.……..…..**108-110**
Влияние полимерной матрицы на фотостабильность бетанина в конъюгатах хитозана и пектина с фенольными кислотами
Хантимерова Ю.М.……..……...**110-112**
Разработка многозонной системы контроля температурных режимов FGF-принтера с индукционным нагревом для получения композиционных изделий с заданными свойствами
Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Хантимерова Ю.М.……..……...**112-114**
Исследование электрофизических свойств композиционного материала на основе АБС-пластика и функционализированных углеродных нанотрубок для 3D-печати биполярных пластин
Шилов А.В., Медведский А.В.…….……...**114-116**
Фотографическое определение координат точек наклонной плоскости

Секция 3. ТРИБОЛОГИЯ, ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТИ
Башаримов М.В., Жигалов А.Н., Черняков Ю.Д.……...**117**
Факторы, определяющие адгезионные свойства твердосплавной подложки и стойкость PVD покрытий
Григорьев Ф.А., Юркова Ю.М.…….……..…..**118-119**
Противоизносная добавка на основе моноэтаноламидов касторового масла к индустриальному маслу на основе растительного сырья
Зверев Ф.А., Крол А.А., Перевозников С.С.……..…..**120-122**
Влияние иммерсионно осаждённой плёнки золота на коррозионную стойкость электрохимически осажденных покрытий Ni–B в хлоридсодержащей среде
Колпаков Н.Ю. ……..……...**122-124**
Исследование влияния малеида Ф на триботехнические, физико-механические и теплофизические характеристики полимерных композитов для узлов стационарного трения
Киселевич А.Г., Шклейник А.Р., Соснов Е.А.…….……...**124-126**
Влияние элементоксидных поверхностных структур на спектральные характеристики ZrO_2
Киселевич А.Г., Соснов Е.А.……..……..…..**126-127**
Химическая сборка титанооксидной системы на поверхности нелегированного ZrO_2
Лазарчик М.В., Роговой А.Н., Криволапов П.Н., Шевцов А.И.……..……..…..**128-129**
Исследовать закономерности влияния толщины промежуточного слоя гальванической меди на стальной основе на адгезионную прочность слоя и нанесенного на стальной диск фрикционного материала
Парфимович И.Д., Комаров Ф.Ф., Пилько В.В. (мл.), Чижов И.В.……....**129-131**
Трибологические свойства 3D-печатных фотополимерных композитов с гибридным углеродным наполнением (УНТ/графен)
Пилипчук Е.В., Комякевич О.Ю.……..……..…..**131-133**
Оценка несущей способности смазочных материалов
Чернецкий С.И., Петришин Г.В., Невзоров М.В. ……..……...…...**133-135**

Оптимизация режимов борирования режущих элементов сельхозмашин для условий эксплуатации в аграрных регионах с умеренным климатом
Шрубок М.Д., Сапсалёв Д.В., Мельникова Г.Б., Чижик С.А. ……...**136-137**
Смачиваемость Ленгмюра – Блоджетт плёнок на основе смесей поливинилкарбазола и полиметилметакрилата
Юркова Ю.М., Григорьев Ф.А. ……..……..……..……..**138-140**
Амиды жирных кислот растительных масел в качестве противоизносных добавок
Юркова Ю.М., Григорьев Ф.А., **Григорьев Ю.В.** ……..……...……...**140-142**
Использование 1,3-дизамещённых-5-иминотетразолов в качестве антифрикционных присадок

Секция 1 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (НАНОМАТЕРИАЛЫ, ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ, ПОКРЫТИЯ И ДР.)

ТЕХНОЛОГИИ УВЕЛИЧЕНИЯ УРОВНЯ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Е.Л. Антонова[1], В.Е. Сыцко[2], И.М. Грошев[3]

[1]Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительной кооперации», Гомель, Беларусь, viramaina3@yandex.by

[2]Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительной кооперации», Гомель, Беларусь, val19-10@mail.ru

[3] ОАО «Витебскдрев» ЦЗЛ, groshev.i@vitebskdrev.com

Введение

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция увеличения исследований использования вторичных полимерных материалов в различных отраслях промышленности. В связи с увеличением объемов отходов производства предприятий, отходов объектов общественного питания, учебных заведений, бытового сектора, является особо значимым изучение новых технологий переработки. За рубежом большинство компаний используют свои технологии и практический опыт применения вторичных композиционных материалов для изделий гражданских отраслей. В Республике Беларусь в большей степени используется импортное и дорогостоящее полимерное сырье.

В Беларуси утверждена Национальная стратегия развития экономики замкнутого цикла до 2035 года. Базовый принцип циркулярной экономики такой: добывай, производи, используй повторно. Одна из задач — увеличение уровня повторного использования твердых коммунальных отходов до 90%. Достичь такой высокой планки возможно только при условии внедрения прорывных технологий. Речь идет о самых проблемных с точки зрения экологии отходах — полимерах [1; 2].

Цель

Процесс получения вторичных изделий представляет собой правильное измельчение, смешивание и выбор оптимальной температуры плавления. Был проведен эксперимент, целью которого стала переработка отходов полимеров, таких как: АБС пластик, полипропилен, полиэтилен и ПВХ, с добавлением древесной стружки (1:10).

Материалы и методы

Полимерные отходы были очищены и измельчены до размеров 5-8 мм. Затем смесь отходов проходила через экструдер. Подбиралась оптимальная температура, которая устанавливалась по датчику и составляла от 120 до 170 °С. Данная температура выбрана исходя из анализа данных технологических регламентов производства [3].

Результаты и их обсуждение

Сложность переработки вторичного сырья заключалась в том, что у разных полимерных отходов отличался индекс расплава, а также следует отметить, что при высокой температуре происходило подгорание древесной стружки. Следовательно все это требовало постоянной настройки температурного режима. Выделялся водяной пар, газы, а также специфический запах, а экструдер требовал частой очистки.



Рис. 1. **Дробленая смесь полимерных отходов**



Рис. 2. **Однородный расплав полимерных отходов**

Выводы

Систему управления отходами в стране необходимо совершенствовать: переход к зеленой экономике требует значительных инвестиций в разработку новых технологий, в основные средства действующих предприятий для перехода на использование вторичного сырья, а также на поддержку предприятий переработчиков. Разработка новых методов рециклинга вторичных полимеров внесет определенный вклад для национальной экономики страны. Развитие новых технологий переработки и их дальнейшего использования позволит реализовать ряд новых преимуществ, таких как, снижение потребности промышленности в первичных ресурсах, снижение объемов выбросов и отходов производства, а также экономическая эффективность производства. Получение новых материалов на основе вторичных полимеров предполагает комбинирование различных компонентов таким образом, чтобы добиться требуемого уровня технических, эксплуатационных и экологически безопасных характеристик.

1. Основные положения проекта программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026-2030 годы. Официальный сайт [Электронный ресурс]. https://economy.gov.by/ru/pser2030-ru/Режим доступа: – свободный. Дата доступа: 16.08.2026.
2. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 18 августа 2025 г. № 444 https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500444 Дата доступа: 18.08.2026.
3. Информационно-технический справочник. ИТС 32-2022. Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых. Москва, 2022 г./ 606 с.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТА ПОЛИ(СТИРОЛ-БЛОК-ИЗОБУТИЛЕН-БЛОК-СТИРОЛ)

И.А. Березянко, М.И. Макаревич, Л.В. Гапоник, П.А. Никишев

Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь;
bereziankoivan@bsu.by

Поли(стирол-*блок*-изобутилен-*блок*-стирол) (СИБС) относится к классу термоэластопластов – сополимеров, сочетающих свойства резин при комнатной температуре и пластиков при повышенных температурах, что обеспечивает возможность их формования и вторичной переработки. В отличие от промышленных аналогов на основе бутадиена или изопрена, СИБС, состоящий из эластичного центрального блока полиизобутилена и боковых жестких блоков полистирола, обладает повышенной термической и окислительной стабильностью, газонепроницаемостью, а также превосходной био- и гемосовместимостью [1]. В сочетании с отличными механическими характеристиками (прочностью на разрыв и относительным удлинением) эти свойства делают СИБС перспективным материалом для применения в различных наукоёмких областях, в первую очередь в биомедицине. На сегодняшний день описано успешное использование СИБС при производстве искусственных клапанов сердца, микрошунтов для лечения глаукомы, а также для создания коронарных стентов с лекарственным покрытием [2].

СИБС традиционно получают методом последовательного внесения мономеров, включающего квазиживую катионную полимеризацию изобутилена (ИБ) в присутствии дифункционального инициатора с последующим введением стирола (Ст) в систему при конверсии изобутилена близкой к 100% (Рис. 1). Ключевым фактором успешного синтеза СИБС является выбор соинициатора. Среди кислот Льюиса, способных инициировать квазиживую катионную полимеризацию изобутилена (например, $TiCl_4$, BCl_3), только использование $TiCl_4$ позволяло получать высокомолекулярный СИБС с низкой дисперсностью [3]. Однако $TiCl_4$ применяется в значительном избытке по отношению к инициатору ($[TiCl_4]/[I] \geq 30$), что после дезактивации полимеризационной смеси приводит к образованию большого количества диоксида титана (TiO_2), который крайне трудно удаляется из полимера.

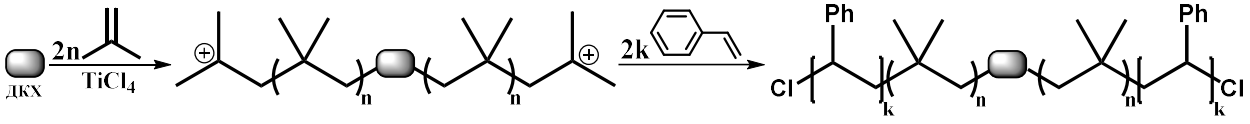


Рис. 1. **Схема синтеза СИБС с использованием $TiCl_4$ в качестве со-инициатора**

Данная работа посвящена разработке инициирующей системы на основе алкилалюминий хлоридов для получения СИБС с высокой молекулярной массой (M_n до 70 000 г/моль) с низкой дисперсностью (Đ < 1,4). Полимеризация проводилась в инертной атмосфере, в смеси растворителей метилциклогексан/CH_2Cl_2 (60/40 об. %) при температуре –80 °C, используя 1,4-бис(2-хлоризопропил)бензол (ДКХ) в качестве инициатора.

Детальное исследование полимеризации ИБ показало, что как $Me_{1.5}AlCl_{1.5}$ так и Me_2AlCl способны инициировать квазиживую катионную полимеризацию, однако применение Me_2AlCl является предпочтительным ввиду его большей устойчивости к гидролизу. Изучение катионной полимеризации Ст с использованием модельного инициатора в присутствии метилалюминийхлоридов продемонстрировало, что процесс протекает по “живому” механизму только при использовании Me_2AlCl в качестве соинициатора и исключительно в присутствии нуклеофильной добавки 2,6-диметилпиридина (ДМП).

Таким образом, методом контролируемой катионной полимеризации изобутилена и

стирола на инициирующей системе ДКХ/Me_2AlCl/ДМП методом последовательного внесения мономеров был успешно синтезирован целевой СИБС, характеризующиеся микрофазово-разделенной морфологией и отличными механическими свойствами: прочностью при растяжении 13,2 МПа при относительном удлинении около 900 % (Рис. 2). Образующийся при дезактивации оксид алюминия удаляется из полимера значительно легче по сравнению с TiO_2, образующегося в случае использования $TiCl_4$ в качестве со-инициатора.

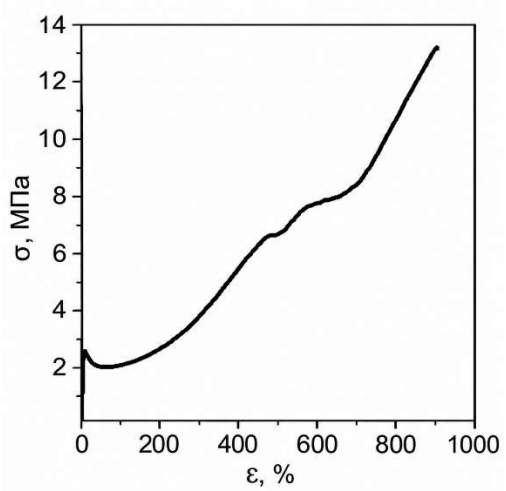


Рис. 2. **Механическая кривая СИБС, синтезированного на инициирующей системе ДКХ/Me_2AlCl/ДМП**

1. Maji P. and Naskar K. Styrenic block copolymer-based thermoplastic elastomers in smart applications: Advances in synthesis, microstructure, and structure–property relationships – A review // J. Appl. Polym. Sci. – 2022 (**139**), e52942.
2. Basak S. Thermoplastic elastomers in biomedical industry – evolution and current trends // J. Macromol. Sci., Part A: Pure Appl. – 2021 (**58**), 579-593.
3. Makarevich M. et al. Aspects of the Synthesis of Poly(styrene-block-isobutylene-block-styrene) by $TiCl_4$-Co-initiated Cationic Polymerization in Open Conditions // Macromol – 2021 (**1**) 243-255.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Химические процессы и технологии», 2026-2030 гг. (задание 2.1.01.01, № гос. регистрации 20261334).

СРАВНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СЖАТИИ СТЕКЛОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И ПОЛИАМИДА 66

А.С. Брундуков, И.С. Шилько

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32А, Беларусь;
alexeybrundukov@gmail.com

Введение

Благодаря высоким эксплуатационным характеристикам композиты на основе ПЭЭК и ПА 66 находят своё применение в ответственных узлах технологического оборудования [1]. Изделия из ПЭЭК способны длительное время эксплуатироваться при температурах свыше 150 °C [2], в то время как для изделий из ПА 66 это является пределом эксплуатационных характеристик [3]. В то же время, высокая стоимость ПЭЭК ограничивает его применение в менее ответственных технологических узлах, в которых ПА 66 является оптимальной, менее

дорогостоящей альтернативой [4]. В связи с этим актуальным является сравнение физико-механических характеристик ПКМ на основе ПЭЭК и ПА 66.

Цель

Сравнение деформационно-прочностных характеристик при сжатии полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и полиамида 66 (ПА 66).

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследования были выбраны серийно выпускаемые ПЭЭК стеклонаполненные композиты марок PEEK5600GF30 (Junhua PEEK, Китай), SustaPEEK GF30 (Röchling Industrial, Германия), а также стеклонаполненный полиамид PA66 GF30 марок Zedex ZX-066GF30 (Plastmass Group, Россия), Sustamid 66 GF30 (Röchling Industrial, Германия).

Механические характеристики при статическом сжатии определяли на универсальной испытательной машине Instron 5567 по ГОСТ 4651-2014, при скорости сжатия 2 мм/мин и температуре окружающей среды 25°С. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69, на аналитических лабораторных весах GX-1000, («A&D Co. LTD», Япония).

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены физико-механические характеристики исследуемых ПКМ при статическом сжатии. В качестве основных характеристик для сравнения были выбраны: модуль упругости ($E_{упр}$); предел пропорциональности ($\sigma_{пц}$); предел упругости ($\sigma_{упр}$); предел прочности ($\sigma_в$) и деформация разрушения ($\varepsilon_{разр}$).

Для всех исследуемых материалов значения модуля упругости находится в интервале 3-4 ГПа. Деформация при статическом сжатии образцов, изготовленных из ПЭЭК марки SustaPEEK GF30, носит пластичный характер в отличие от хрупкого, характерного для других исследуемых материалов. В связи с этим для него не удалось установить значения предела прочности и деформации разрушения.

Композит на основе ПЭЭК марки PEEK 560GF30 обладает наивысшим комплексом физико-механических характеристик (модуль упругости, предел прочности, деформации разрушения и плотность) среди всех исследуемых материалов.

Таблица 1. **Физико-механические характеристики исследуемых стеклонаполненных термопластов**

Материал \ Характеристика		$\Delta E_{упр}$, ГПа	$\Delta\sigma_{пц}$, МПа	$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	$\Delta\sigma_в$, МПа	$\Delta\varepsilon_{разр}$, %	ρ, г/см^3
PEEK GF30	Junhua	3,80	70,41	86,49	293,41	51,41	1,56
	SustaPEEK	3,72	82,78	93,66	—	—	1,51
PA66 GF30	Sustamid	3,75	65,33	82,92	211,92	39,27	1,33
	Zedex	3,05	49,24	62,23	229,55	48,04	1,40

Выводы

Стеклонаполненные композиты на основе полиэфирэфиркетона обладают более высокими деформационно-прочностными характеристиками при статическом сжатии в сравнении с композитами на основе полиамида 66. Различие исследуемых характеристик составило 20-40 %, при этом наибольшее отличие характерно для предела пропорциональности, а минимальное для

модуля упругости.

1. Саламов А.Х. Композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) / Саламов А.Х., Микитаев А.К., Беев А.А. // Наука и образование. – 2015. – С.145–150.
2. Lamorinière S. Carbon nanotube enhanced carbon Fibre-Poly(ether ether ketone) interfaces in model hierarchical composites / Lamorinière S., Jones M.P., Ho K., Kalinka G., Shaffer M.S.P., Bismarck A. // Composites Science and Technology – 2022. – vol. 221 – P.109327.
3. Кузнецов А. А., Семенова Г. К., Свидченко Е. А. Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения //Вопросы материаловедения. – 2009. – №. 1. – С. 116-126
4. Саламов А. Х., Микитаев А. К., Беев А. А. Полиэфиркетоны: свойства и применение //Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – №. 8-3. – С. 21.

ОПТИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ, СФОРМИРОВАННЫХ В СРЕДЕ ДИМЕТИЛФОРМАМИДА И ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДА

В.С. Будник, У.Е. Гога, М.А. Волынец, А.А. Позняк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;
valeria.budnik@mail.ru

Введение

Гибридные органо-неорганические перовскиты широко исследуются ввиду перспективы их применения в высокоэффективных и относительно недорогих в изготовлении солнечных элементах. Для получения высококачественных тонких пленок перовскита важным процессом является контролируемая кристаллизация, которая позволяет уменьшить количество структурных дефектов [1].

Методика эксперимента

Растворы перовскитов составов $CH_3NH_3PbI_2Cl$ и $CH_3NH_3PbI_3$, концентрации которых в диметилсульфоксиде (ДМСО) составили 1 моль/л, а в диметилформамиде (ДМФА) – 0,1 и 0,2 моль/л соответственно, получали смешиванием йодида либо хлорида метиламмония с йодидом свинца(II) при молярном соотношении компонентов 1:1. Пленки перовскитов были получены из растворов методом *drop-coating* на стеклянную подложку, нагретую до 100 °С. После нанесения проводили отжиг в атмосфере окружающей среды: из растворов в ДМСО при 110 °С в течение 30 мин, из ДМФА – при 100 °С в течение 5 минут.

Морфология исследована с помощью оптического микроскопа МКИ-2М при увеличении ×500. Оптические спектры пропускания (*T*, %) сняты на спектрофотометре *MC*-122 в области длин волн (λ) 330–1000 нм.

Результаты и обсуждение

Все сформированные образцы имели черный цвет. На рис. 1 представлены оптические микрофотографии поверхности плёнок $CH_3NH_3PbI_2Cl$, сформированных как из ДМФА, так и из ДМСО. При использовании ДМФА пленки $CH_3NH_3PbI_3$ содержат крупные кристаллиты в форме неправильного шестиугольника, вогнутые в центре, размерами от 8,1 до 23,6 мкм (средний размер 15,7 мкм). Пленки $CH_3NH_3PbI_2Cl$ состоят из мелких квадратных кристаллитов размерами 3,4–6,3 мкм с редкими промежутками между ними (рис. 1, а). При использовании ДМСО пленки составов $CH_3NH_3PbI_3$ и $CH_3NH_3PbI_2Cl$, состоящих из сросшихся на границах сферолитных доменов, демонстрируют ячеистую структуру Вороного с четким «черепаховым» узором. Размер сферолитов перовскита состава $CH_3NH_3PbI_3$

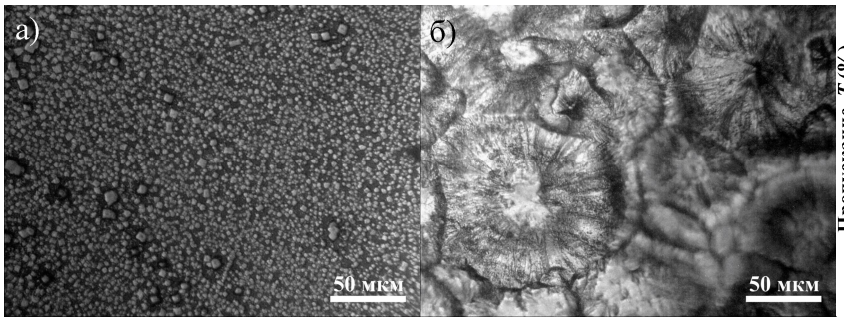


Рис. 1. **Поверхность перовскитов: а – $CH_3NH_3PbI_2Cl$ в среде ДМФА; б – $CH_3NH_3PbI_2Cl$ в среде ДМСО**

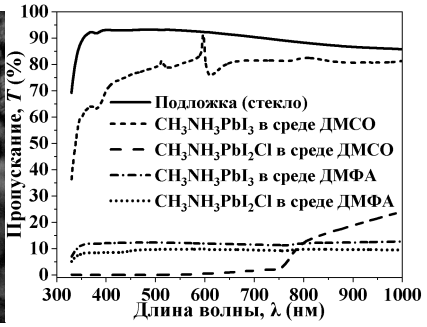


Рис. 2. **Оптическое пропускание перовскитов**

составляет 37–127 мкм, демонстрируя значительный разброс геометрических параметров. В случае монохлорзамещенного перовскита (рис. 1, б) происходит относительное выравнивание размеров доменов (диаметр от 60 до 99 мкм, в среднем 71 мкм). При этом заметно конусообразное вытягивание центров сферолитных доменов перпендикулярно плоскости подложки.

Результаты исследования оптических характеристик полученных образцов представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что при использовании ДМФА для синтеза перовскита состава $CH_3NH_3PbI_3$ пропускание лежит в пределах от 7,0 % при $\lambda = 330$ нм до 12,7 % при $\lambda = 1000$ нм, а для перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$ пропускание не превышает 10 % при $\lambda = 596$ нм и не опускается ниже отметки 8,3 % при $\lambda = 380$ нм.

При использовании ДМСО для синтеза трийодсодержащего образца ($CH_3NH_3PbI_3$) в начале исследуемого спектрального диапазона пропускание вначале резко возрастает от 36,4 % при длине волны 330 нм до 79 % при $\lambda = 500$ нм. Аномальные пики мнимого просветления при 512 и 597 нм (до 82 и 90 %), не характерные для фундаментального поглощения данного полупроводника, обусловлены прямой геометрией оптической схемы прибора в сочетании с высоким квантовым выходом фотолюминесценции: происходит неселективная засветка кремниевого фотодетектора изотропным излучением интенсивно люминесцирующего образца. В дальнейшем пропускание остается примерно постоянным, незначительно изменяясь относительно 80 % в спектральном диапазоне 650–1000 нм.

Образец монохлорзамещенного перовскита в диапазоне длин волн 330–550 нм практически непрозрачен, затем пропускание медленно монотонно увеличивается до $T = 2{,}17$ % при $\lambda = 750$ нм. В спектральном промежутке 745–800 нм пропускание резко возрастает до $T = 12{,}1$ %. Положение этой ступеньки определяется краем полосы собственного поглощения, оценочно соответствуя ширине запрещённой зоны $E_g = 1{,}66$ эВ, что неплохо согласуется с литературными данными [2]. При увеличении длины волны более 800 нм пропускание вновь монотонно растет, достигая при 1000 нм значения $T = 24{,}1$ %.

Заключение

Исследование образцов $CH_3NH_3PbI_3$ и $CH_3NH_3PbI_2Cl$, сформированных в ДМФА и ДМСО, позволяет выявить взаимосвязь между химическим составом гибридных органо-неорганических перовскитов, природой растворителей, а также морфологией и пропусканием получаемых пленок. При нанесении раствора ДМФА испаряется быстрее, имея температуру кипения на 36 °С меньше, чем у ДМСО. Это вызывает быстрое пересыщение, приводя к взрывной нуклеации и формированию неоднородных пленок с большим количеством пустот и малым размером зерен.

Молекулы ДМСО прочно связываются со свинцом, образуя стабильные промежуточные комплексы, что замедляет процесс образования перовскитного соелинения. К тому же ДМСО испаряется медленней, что препятствует быстрому осаждению перовскита. Процесс кристаллизации замедляется, позволяя вырастить крупнокристаллические пленки с меньшим

количеством пустот.

Наименьшим пропусканием во всем спектральном диапазоне обладает монохлорзамещенный перовскит, синтезированный из ДМСО (T ≤ 9,6 %).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (гранты № 26–3086 М и №26–3090 М) и Государственной программы научных исследований (ГПНИ) 2026–2030 «Фотоника и микроэлектроника», задание 5.3.09.

1. Xie J. et al. Modulating $MAPbI_3$ perovskite solar cells by amide molecules: Crystallographic regulation and surface passivation // Journal of Energy Chemistry. – 2020 (**56**), 179–185.
2. Quarti C. et al. Structural and optical properties of methylammonium lead iodide across the tetragonal to cubic phase transition: implications for perovskite solar cells // Energy Environ. Sci. – 2015 (**9**), 155–163.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГЕТЕРОФАЗНЫХ FE–ZR–O НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ

И.С. Веремей, С.А. Ковалева

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Разработка легких и технологичных радиопоглощающих материалов с широким рабочим диапазоном частот требует сочетания магнитных и диэлектрических механизмов диссипации электромагнитной энергии [1]. Одним из перспективных подходов является формирование гетерофазных наполнителей с развитой межфазной структурой [2]. При этом закономерности формирования таких систем Fe–Zr–O при механохимическом синтезе и их влияние на электромагнитные характеристики композитов на основе СВМПЭ изучены недостаточно.

Цель работы − установить закономерности формирования структурно-фазового состояния гетерофазных порошков системы Fe-Zr-O при механохимическом синтезе и определить влияние их состава и микроструктуры на электромагнитные свойства композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

В работе исследовали системы Fe_2O_3-Zr, Fe_2O_3-Zr–Fe и Fe_2O_3-Fe/Zr с различной степенью разбавления металлическим железом. Механохимический синтез проводили в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице АГО-2; в качестве энергетического параметра использовали удельную дозу подведенной механической энергии D. Для частично прореагировавших систем дополнительно применяли самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

Фазовый состав и параметры кристаллической структуры определяли методами РФА и РСА, морфологию и распределение элементов − методами СЭМ и энергодисперсионного рентгеновского анализа. Электромагнитные характеристики композитов исследовали в диапазоне 2–18 ГГц по S-параметрам с последующим расчетом комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей методом Николсона–Росса–Уэйра. Потери на отражение определяли расчетом в рамках теории линий передачи и сопоставляли с экспериментальными данными.

В стехиометрической системе Fe_2O_3-Zr окислительно-восстановительная реакция развивается при дозе механической энергии 0,84 кДж/г и практически завершается при 1,68 кДж/г. При увеличении дозы от 0,84 до 1,68 кДж/г содержание α-Fe возрастает с 25 до 29 мас.%, а кубической модификации ZrO_2 − с 45 до 48 мас.%. Одновременно содержание FeO снижается с 10 до 7 мас.%, моноклинной ZrO_2 — с 20 до 16 мас.%. Размер кристаллитов кубической ZrO_2 уменьшается с 17 до 14,6 нм, при этом микродеформация кристаллической решетки возрастает с 1,17 до 1,7 %.

Механохимическое взаимодействие сопровождается не только измельчением исходных компонентов, но и формированием выраженной структурной неоднородности. Образуются агломераты размером 10-50 мкм, состоящие из частиц размером 0,5-3 мкм. Металлическая и оксидная составляющие распределяются неравномерно. В продуктах синтеза сохраняется около 7 мас.% FeO, что свидетельствует о неполном восстановлении исходного Fe_2O_3.

Введение металлического железа позволяет изменять режим протекания реакции. Добавка 33 мас.% Fe снижает удельное тепловыделение и переводит процесс в более плавный кинетически контролируемый режим. При D = 8,4 кДж/г в данной системе образуется 39 мас.% ZrO_2, из которых 23 мас.% кубической и 16 мас.% моноклинной модификаций. При этом в продукте сохраняются 5 мас.% Fe_2O_3 и 7 мас.% FeO.

Существенное влияние на фазообразование оказывает морфология восстановителя. Предварительное механическое сплавление Fe-Zr приводит к формированию наноструктурированных механокомпозитов Fe/xZr. Для Fe-20Zr при увеличении дозы механической энергии от 1,68 до 8,4 кДж/г размер кристаллитов α-Fe уменьшается с 40 до 13 нм. В системе Fe-50Zr размер кристаллитов железа снижается с 160 до 13 нм. Использование полученных механокомпозитов в качестве восстановителей приводит к формированию композиционных частиц Fe/ZrO_2 матричного типа.

Увеличение содержания циркония в механокомпозитном восстановителе повышает полноту протекания реакции. После обработки системы Fe_2O_3-Fe/20Zr при D = 8,4 кДж/г сохраняются Fe_2O_3 и FeO, тогда как в системе Fe_2O_3-Fe/50Zr фиксируются преимущественно α-Fe и кубическая ZrO_2 с размерами кристаллитов 6,5 и 3,7 нм соответственно. Таким образом, содержание циркония в восстановителе и его структурное состояние определяют степень превращения исходных компонентов и фазовый состав ZrO_2.

Для частично прореагировавших порошков исследована комбинированная обработка, включающая механохимическую активацию и последующий СВС. Предварительная механоактивация системы Fe_2O_3-Fe/20Zr приводит к снижению интенсивности горения и переходу реакции в тлеющий режим. В результате формируются композиционные частицы типа «ядро–оболочка» с металлическим ядром размером 1–8 мкм и оболочкой из ZrO_2. Максимальная температура СВС составила 570 °C и сохранялась в течение 50 с. После термообработки размер кристаллитов железа увеличился с 10 до 27 нм, гематита — с 10 до 46 нм; одновременно в составе продукта формируется Fe_3O_4.

Для исследования электромагнитных свойств были выбраны три типа наполнителя. Состав S1 включал 52 мас.% Fe, 9 мас.% Fe_2O_3+FeO и 39 мас.% ZrO_2+ZrO_x; S2 − 69, 11 и 20 мас.% соответственно; S3 − 47, 35 и 18 мас.%. При содержании наполнителя 80 мас.% и горячем прессовании в матрице СВМПЭ формируется выраженная ячеистая структура с размером ячеек 60−120 мкм. Частицы наполнителя преимущественно локализуются в межгранулярном пространстве полимера и образуют непрерывную сетку по границам полимерных ячеек.

Электромагнитные свойства существенно зависят от фазового состава наполнителя. Для S1 и S3 действительная часть диэлектрической проницаемости составляет около $\varepsilon' = 12$, тогда как для S2 она значительно ниже − $\varepsilon' = 5{,}5$-6, при $\varepsilon'' = 0{,}1$-0,3 в диапазоне 1-18 ГГц. Для всех исследованных композитов установлено доминирование магнитных потерь над диэлектрическими, причем максимальные значения μ'' наблюдаются для S3.

На рисунке 1 (а-в) представлена частотная зависимость потерь на отражение сигнала для образцов S1−S3 на металлической подложке в диапазоне 2−18 ГГц при различных толщинах поглощающего слоя. Наиболее высокие значения поглощения получены для образца S1. Минимальные отражательные потери составили RL = -41,8 дБ при частоте 5,46 ГГц и толщине слоя 3,5 мм. Для толщин 1,5-5,0 мм значения RL ниже -20 дБ наблюдались в диапазоне 3,5-14,5 ГГц. Для S3 минимальные потери составили -33 дБ при 4,7 ГГц и толщине 3,5 мм; эффективное поглощение RL ≤ -20 дБ наблюдалось в диапазоне 3,1-5,9 ГГц.

Установлена различная физическая природа электромагнитного отклика исследованных составов. Для S1 и S3 высокое поглощение связано с сочетанием магнитных и диэлектрических потерь, межфазной и дипольно-релаксационной поляризации, а также с механизмом четвертьволнового гашения. S3, содержащий максимальную долю оксидов железа, характеризуется выраженным магнитным резонансом в области 4-6 ГГц. В S2, несмотря на максимальное содержание металлического железа (69 мас.%), металлические частицы изолированы диэлектрической фазой, что препятствует формированию перколяционного проводящего кластера и обеспечивает низкий уровень отражения.

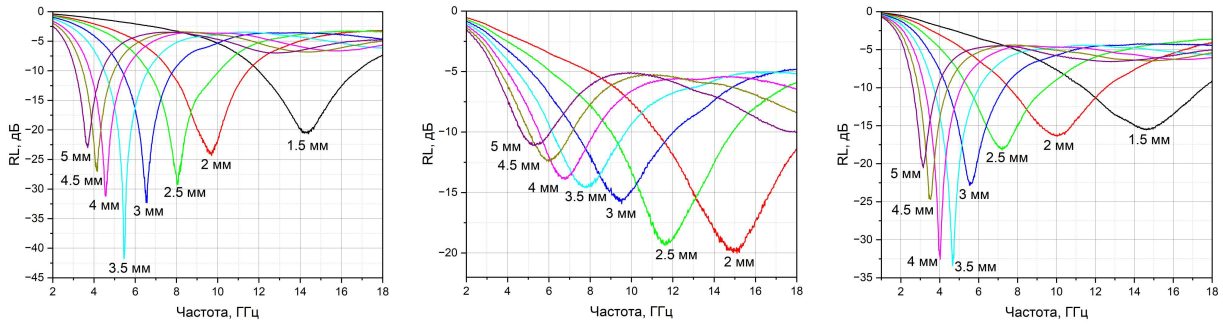


Рис. 1. **Частотная зависимость потерь на отражение образцов S1–S3 (*а–в*) при различных толщинах поглощающего слоя**

Установлена взаимосвязь между составом реакционной системы, условиями механохимического синтеза, структурой наполнителя и его электромагнитными характеристиками. Показано, что состав и морфология восстановителя позволяют управлять фазообразованием и структурой Fe–Zr–O.

Получены гетерофазные Fe–Zr–O наполнители для легких радиопоглощающих композитов на основе СВМПЭ. Максимальные отражательные потери составили − 41,8 дБ, что соответствует поглощению более 99,99 % падающей мощности.

Показана возможность регулирования радиофизических характеристик композитов изменением состава и способа получения наполнителя, а также толщины поглощающего слоя.

1. Facile fabrication of 3D biochar absorbers dual-loaded with Fe_3O_4 nanoparticles for enhanced microwave absorption / T. Chen, J. Cai, D. Gong [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 935, Part 1. – P. 168085. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168085.
2. Improved electromagnetic interference shielding performances of carbon nanotube and carbonyl iron powder (CNT@CIP)-embedded polymeric composites / I D. Jang [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. - 2022. - Vol. 18. - P. 1256-1266. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.02.134.

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ УГЛЕРОДНОЙ ПАСТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАНИЛИНА И ХСЛ, И ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

М.А. Волынец, У.Е. Гога, А.А. Позняк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;
volynetsmaria1@mail.ru

Введение

Электропроводящие полимеры (иногда называемые *synthetic metals*) являются объектом

активных исследований. Проводящие полимеры обладают значительными преимуществами в сравнении с другими проводниками благодаря низкой токсичности, простоте синтеза и химической структуре, обеспечивающей наличие комплекса уникальных свойств и обеспечивающих эффективный перенос заряда. Полианилин (*PANI*) является одним из наиболее перспективных проводящих полимеров, обладая высокой проводимостью и стабильностью. Определенную проблему представляют термореактивные свойства *PANI*, но это отчасти компенсируется созданием композитов с другими материалами, что также увеличивает срок службы *PANI.* Благодаря свойствам *PANI* открываются широкие возможности его применения при производстве суперконденсаторов, накопителей энергии, антикоррозионных покрытий, сенсоров, элементов солнечных батарей, антимикробных материалов, сорбентов, покрытий, поглощающих электромагнитное излучение [1]. Одним из примеров является применения *PANI* в качестве одного из компонентов токопроводящих углеродных паст. Данные композиты привлекательны благодаря сочетанию ценных свойств: высокой электропроводности, низкому фоновому току, возможности работать в большом диапазоне напряжений без разрушения электрода, химической инертности, гидрофобности и низкой стоимости изготовления [2]. Благодаря этим качествам они находят широкое применение в электроаналитике (например, в составе электрохимических сенсоров для определения биомаркеров и загрязнителей) [3], а также рассматриваются как перспективная альтернатива металлическим электродам в оптоэлектронных устройствах, например, в перовскитных солнечных элементах [4]. Также углеродно-пастовый электрод обеспечивает возможность обновления поверхности и обеспечивает высокую ремонтопригодность изделий [2].

Материалы, методика синтеза

Углеродную проводящую пасту получали смешением 30 мг нитроцеллюлозы, 250 мкл этилацетата, 59 мг химически стойкого лака (ХСЛ) и 250 мкл ацетона. Затем добавили предварительно измельченные проводящие компоненты: 24 мг *PANI*, 72 мг сажи, и 24 мг графита. Все реактивы и компоненты промышленного изготовления, кроме *PANI*, который был синтезирован самостоятельно, как описано ранее в [5]. Для смешивания использовали ультразвуковую ванну *ZX*-009 в течение 10 минут при температуре 40 °C. Свежеприготовленную пасту наносили на стеклянную подложку с контактными площадками из алюминиевой фольги. Образец сушили на плитке при температуре 60 °C в течение 10 минут. Изображения образца были получены при помощи оптического микроскопа *Levenhuk* 0701*m*0417. Измерения электрических параметров осуществляли с помощью мультиметра *UT*61*E*$^{+}$.

Результаты и их обсуждение

Вид сбоку образца, полученный с помощью оптического микроскопа, показан на рис. 1 а, программное обеспечение, прилагаемое к микроскопу, позволило определить толщину слоя, оказавшуюся равной 0,597 мм. Для расчета удельного электрического сопротивления образца по формуле (1) были также проведены измерения длины и ширины образца.

$$\rho = \frac{R \cdot d \cdot H}{l}, \qquad (1)$$

где R – сопротивление образца, l – длина, d – ширина и H – толщина слоя.

Сразу после высушивания углеродной пасты на плитке было измерено сопротивление, составившее 3660 Ом, через две недели сопротивление уменьшилось в 2,3 раза, что вызвано испарением остаточных растворителей в ходе естественной сушки и усадкой полимерной матрицы в результате ее релаксации. Сближение частиц проводящего наполнителя при увеличении его объемной доли ведет к росту числа проводящих контактов и, соответственно, к снижению электросопротивления композита [6]. Временная зависимость сопротивления углеродной пасты после нанесения на подложку показана на рис. 1, б. Рассчитанное удельное сопротивление углеродной пасты после ее стабилизации составило 0,787 Ом·м.



Рис. 1. **Вид образца сбоку, полученный с помощью оптического микроскопа (а), временная зависимость сопротивления углеродной проводящей пасты (б) и вид сверху образца (врезка)**

Выводы

В ходе работы синтезирована углеродная проводящая паста на основе *PANI*, нитроцеллюлозы и ХСЛ. После стабилизации системы сопротивление уменьшилось в 2,3 раза и удельное сопротивление составило 0,787 Ом·м. Показано, что при сушке на воздухе при комнатной температуре сопротивление образца стабилизируется примерно через две недели после выдержки. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании составов углеродных проводящих паст для получения электродов и проводящих дорожек с контролируемыми свойствами.

Работа выполнена при поддержке грантов № 26-3092 М и № 26-3086 М Министерства образования Республики Беларусь, и ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», задание 4.1.20.

1. Gutnik I.V., Dyachkova T.P., Burakova E.A. [et al.] Polyaniline and its composites with carbon nanomaterials: preparation, properties, application // J. Adv. Mater. Technol. — 2024 (**9**), № 2, 132—151
2. Que M., Zhang B., Chen J. [et al.] Carbon-based electrodes for perovskite solar cells // Mater. Adv. — 2021 (**2**), № 17, 5560—5579
3. Tajik S., Beitollahi H., Nejad F.G. [et al.] Developments and applications of nanomaterial-based carbon paste electrodes // RSC Adv. — 2020 (**10**), № 36, 21561—21581
4. Волынец М.А., Гога У.Е., Туманов Т.А. Электропроводящие углеродные композиции на основе нитроцеллюлозы и ХСЛ... // Физ. конд. сост. : материалы XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно. — 2026. — С. 34—37
5. Гога А.В., Себешев А.А., Туманов Т.А., Туровец У.Е. Синтез и свойства полианилина // Физ. конд. сост.: материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно. — 2025. — С. 66—69
6. Philip B., Jewell E., Worsley D. The impact of solvent characteristics on performance and process stability of printed carbon resistive materials // J. Coat. Technol. Res. — 2016 (**13**), № 5, 911—920

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ДИСПЕРСНОСТЬ ПОРОШКА ВОЛЬФРАМА

С.А. Герман, Д.И. Тишкевич, А.А. Роткович, А.А. Зубеня

Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь; stepangrmn@gmail.com

Введение

Порошковые материалы на основе вольфрама востребованы при получении изделий, работающих в условиях высоких температур, интенсивных тепловых потоков и ионизирующего

излучения. Практическая ценность W определяется сочетанием высокой плотности 19,25 г/см³, температуры плавления 3422 °C, теплопроводности и малого коэффициента термического расширения [1]. При этом технологическое поведение порошка в значительной степени задаётся размером и формой его зерен. Механоактивация является одним из способов целенаправленного изменения дисперсности: многократные ударно-сдвиговые воздействия вызывают разрушение частиц, образование дефектов и рост удельной поверхности [2]. Однако по мере измельчения возрастает склонность мелких частиц к объединению в агрегаты, поэтому длительное воздействие не обязательно приводит к пропорциональному уменьшению их размера. Цель работы — определить закономерность изменения дисперсности и морфологии порошка W с увеличением времени механоактивации и установить продолжительность обработки, после которой дальнейший помол становится малоэффективным.

Материалы и методы

Исследовали порошок вольфрама марки ПВЧ. Обработку проводили в планетарной мельнице BM6 Pro (POWTEQ, Китай) при 350 об/мин с твердосплавной размольной оснасткой. Продолжительность механоактивации составляла 30, 60, 120, 180, 240 и 300 мин; исходный порошок рассматривали как состояние 0 мин. Морфологию оценивали методом сканирующей электронной микроскопии на Carl Zeiss EVO10 при ускоряющем напряжении 20 кВ. Размеры зерен измеряли в SmartSEM и Gwyddion не менее чем по пяти СЭМ-изображениям для каждого режима. Полученные распределения аппроксимировали функцией Гаусса, а для сопоставления состояний использовали наиболее вероятный размер зерен (НВРЗ).

Результаты и их обсуждение

Механоактивация привела к выраженному снижению характерного размера зерен. НВРЗ исходного порошка составлял 2,37 мкм. После 30 и 60 мин обработки он уменьшился соответственно до 1,96 и 1,89 мкм, то есть начальный этап характеризовался сравнительно плавным изменением дисперсности. Наиболее заметный эффект наблюдался при переходе от 60 к 120 мин: показатель снизился до 0,93 мкм, более чем в два раза относительно значения после 60 мин. Дальнейшее увеличение времени до 180 и 240 мин сопровождалось уменьшением НВРЗ до 0,77 и 0,63 мкм. Таким образом, за 240 мин обработки размер снизился примерно на 73 % по сравнению с исходным состоянием. При увеличении продолжительности до 300 мин значение составило 0,61 мкм, что лишь приблизительно на 3 % меньше уровня, достигнутого к 240 мин (рис. 1).

Изменение количественного показателя согласуется с эволюцией морфологии на СЭМ-изображениях. В первые 60 мин преимущественно разрушались крупные зерна неправильной формы, при этом сохранялся широкий разброс размеров. Интервал 60–120 мин соответствовал наиболее интенсивному дроблению: доля более мелких угловатых частиц возрастала, а распределение смещалось в субмикронную область. При обработке 120–180 мин одновременно с дальнейшим разрушением становилась заметнее агломерация мелких зерен. На поздней стадии, 180–300 мин, в структуре порошка возрастала доля плотных агрегатов, а скорость уменьшения НВРЗ резко снижалась.

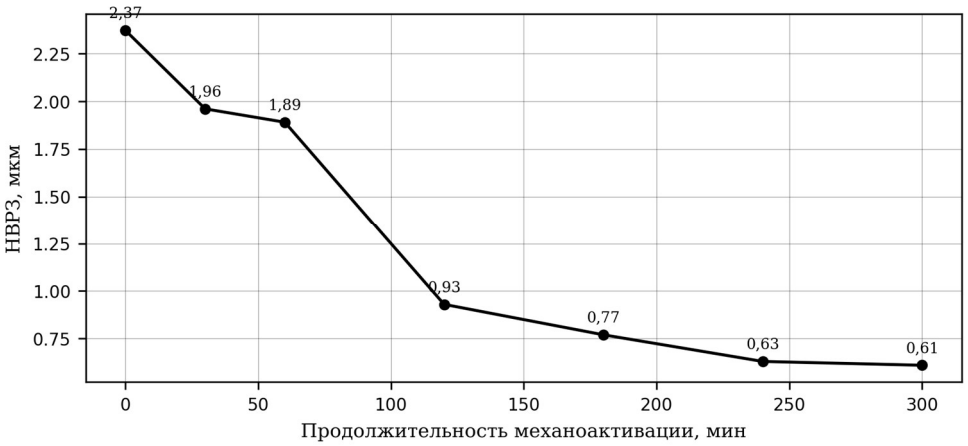


Рис. **1. Зависимость наиболее вероятного размера зерен порошка W от продолжительности механоактивации**

Заключение

Продолжительность механоактивации определяет как дисперсность, так и характер морфологических изменений порошка W. При 350 об/мин НВРЗ уменьшился с 2,37 мкм в исходном состоянии до 0,63 мкм после 240 мин обработки. Максимальная интенсивность измельчения установлена в интервале 60–120 мин. Продление процесса до 300 мин привело только к незначительному дополнительному уменьшению НВРЗ — до 0,61 мкм — вследствие усиления агломерации и приближения системы к равновесию процессов разрушения и объединения частиц. В исследованных условиях продолжительность 240 мин можно рассматривать как рациональную с точки зрения достигнутой дисперсности и дальнейшей эффективности помола.

1. Lassner E., Schubert W.-D. Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds. — New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. — 1999. — 422 p.
2. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling // Progress in Materials Science. — 2001. — Vol. 46. — P. 1–184.

ОПТИЧЕСКИЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИМЕР-ПЕРОВСКИТНЫХ КОМПОЗИТОВ

У.Е. Гога, В.С. Будник, А.А. Позняк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;
u.turovets@bsuir.by

Цель

Перовскиты привлекают особое внимание исследователей благодаря огромному потенциалу использования в фотопреобразователях – они отличаются высокой эффективностью и экономичностью производства [1]. Ключевым направлением работ остается создание способов инкапсуляции нанокристаллов перовскитов – приемом для сохранения их функциональных свойств в стабильном состоянии. Среди полимерных матриц особое место занимают целлюлоза и ее производные – в частности, нитроцеллюлоза (НЦ). К ее преимуществам относят широкую доступность, умеренную стоимость, отсутствие токсичности и способность к биоразложению и биосовместимость. Благодаря сочетанию НЦ с диметилсуль-

фоксидом (ДМСО) удается разрабатывать новые протоколы получения композитов: при этом достигается качественное диспергирование компонентов и обеспечивается точный контроль морфологии при формировании функциональных слоев.

Материалы и методы

Инкапсулированные частицы $CsPbI_3$ получали методом замены растворителя на основе следующих реактивов: растворитель – ДМСО, поверхностно-активные вещества – додециламин (*DDA*) и олеиновая кислота (*OA*), в качестве антирастворителя – этилацетат (*EA*). Мольное соотношение прекурсоров Cs:Pb = 2:1; 500 мкл прекурсорного раствора по каплям добавляли в 5 мл этилацетата (*EA*), в котором предварительно был растворен 1% (от кол-ва сухих реагентов) НЦ. Центрифугирование для отделения более крупных частиц и непрореагировавших компонентов проводили при 3500 об/мин в течение 15 мин. Методом *drop-coating* сформированы сплошные композитные пленки $CsPbI_3$ в матрице НЦ.

Морфология была исследована с помощью оптического микроскопа МКИ 2М при увеличении ×500, а также с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе *Hitachi S*-4800. Оптические спектры снимали на спектрофотометре *MC*-122 (ООО *SOL Instruments*, Беларусь) в области длин волн 330–1100 нм.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) полимер-перовскитных композитов были зарегистрированы при комнатной температуре с использованием монохроматора МДР-23У, оснащенного фотоумножителем *R*9110 (*Hamamatsu, Japan*), в спектральном диапазоне 200–850 нм. Для возбуждения ФЛ применялся непрерывный твердотельный лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм с мощностью 80 мВт. Плотность мощности на образце составила около 2 Вт·см$^{-2}$.

Рентген-дифракционный спектр (РДС) был получен на установке ДРОН 3 М, подключенной к ПК с помощью аналогово-цифрового преобразователя, позволившего регистрировать результаты в цифровом виде, с использованием CuK_α излучения и графитового фильтра с шагом 0,04° и экспозицией продолжительностью 2 с в каждой точке.

Результаты и обсуждение

В результате анализа изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и оптической микроскопии (рис. 1, а, б), выявлена неоднородность морфологии и наличие трех типов структурных элементов: полидисперсные проволоки (толщина 30–845 нм, длина 3–21 мкм), веерные кластеры (30–50 мкм) и фрагментированные области с пористыми наногубками. Высокая оптическая толщина слоя (около 30 мкм) и сильное геометрическое рассеяние света на микронных вискерах обусловливают практически полную непрозрачность образца в видимом диапазоне (пропускание < 5 %). За счет использования полимерной матрицы скол демонстрирует бездефектную структуру, харак-теризующуюся отсутствием пустот.

На РДС (рис. 2, б) доминируют рефлексы орторомбической желтой неперовскитной δ-фазы (главный пик $2\theta = 26{,}5°$), тогда как характеристический пик черной модификации (γ-фазы) в районе $2\theta = 28{,}3°$ находится на уровне шума, что указывает на ее следовые объемы.

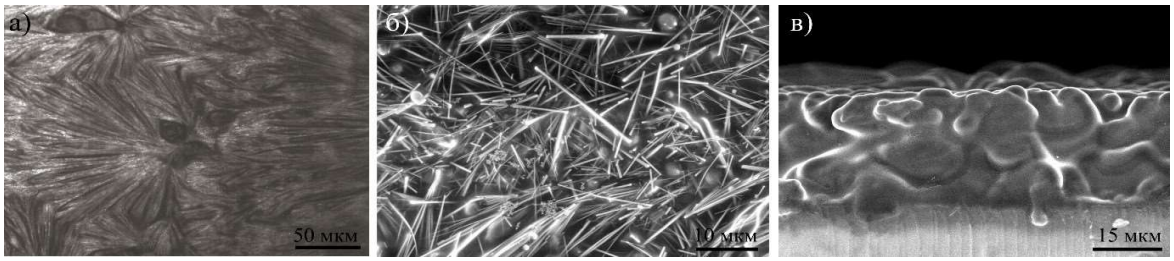


Рис. 1. **Оптические (а) и СЭМ изображения (б) поверхности полимер-перовскитных композитов, и СЭМ изображение скола (в)**

При отсутствии выраженных рефлексов γ-фазы, в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) присутствуют два сигнала (рис. 2, а): узкий интенсивный пик с λ_{max} = 700 нм (*FWHM* = 34 нм) и широкий компонент с λ_{max} = 595 нм. Высокая интенсивность пика γ-фазы (700 нм) при ее со-держании ниже предела обнаружения дифракционными методами обусловлена миграцией эк-ситонов из широкой зоны поглощения δ-матрицы вискеров в редкие включения черного перов-скита. Высокоэнергетический компонент полосы ФЛ на 595 нм (≈ 2,08 эВ) обусловлен кван-тово-размерным эффектом на перемычках наногубок (размер меньше радиуса Бора ≈ 4,6 нм).

«Провал» интенсивности ФЛ в интервале 640–660 нм вызван реабсорбцией оранжевого свечения хвостами Урбаха диспергированной в матрице черной γ-фазы.

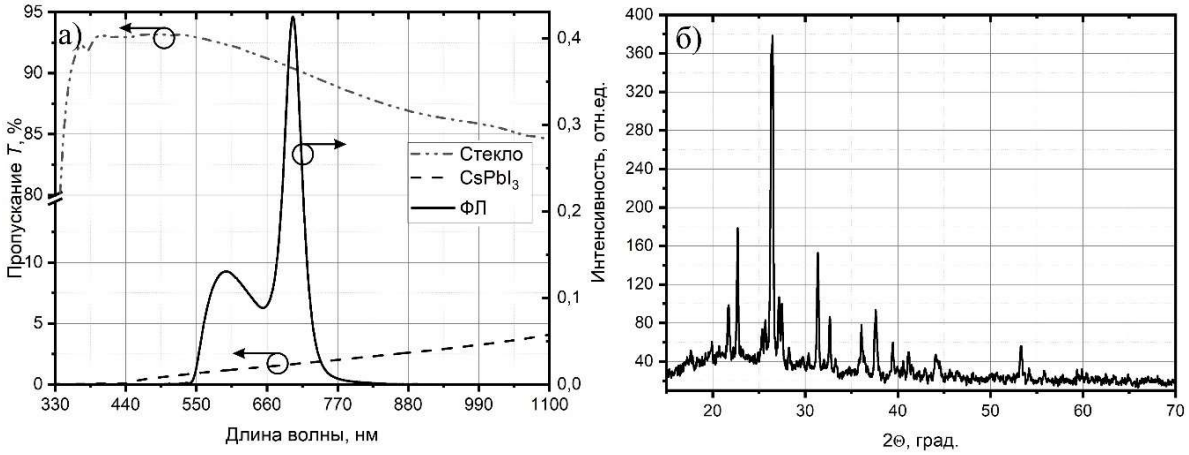


Рис. 2. **Оптическое пропускание и спектр ФЛ (а) и РДС полученного полимер-перовскитного композита (б)**

Заключение

Создание перовскит-полимерных композитов на основе на основе производных цел-люлозы обеспечивает пространственное разделение фаз перовскита, подтвержденное дан-ными ФЛ-спектроскопии (пики на 595 нм и 700 нм), свидетельствует о неоднородности роста кристаллитов в условиях ограниченной диффузии в полимерной матрице.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РБ (гранты № 26-3086 М и № 26-3090 М) и ГПНИ 2026–2030 «Фотоника и микроэлектроника», задание 5.3.09.

1. Listorti A. Colella S., Petrozza A. Perovskite Solar Cells and Light Emitting Diodes: Materials Chemistry, Device Physics and Relationship // Chemical Reviews. — 2025 (**125**), № 10, 5521—5560.

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МАГНЕТИТА ИЗ ОКАЛИНЫ ПОСЛЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

И. А. Греков[1,2]

[1]Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь: ivanhrekau@physics.by

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Металлическая окалина является железосодержащим отходом металлургического производства и может использоваться как вторичное сырьё для получения оксидных материалов [1]. К оксидам железа относятся гематит α-Fe_2O_3, магнетит Fe_3O_4 и вюстит FeO [2].

При переработке окалины в магнетит необходимо установить соотношение целевой и сопутствующих фаз. Количественный рентгенофазовый анализ позволяет сопоставить результаты синтеза при различных составах исходной шихты.

Термобарический синтез основан на совместном воздействии высокой температуры и давления на исходную смесь. Такой подход используется для непосредственного взаимодействия окалины с металлическим железом. Изменение соотношения компонентов при одинаковом режиме обработки позволяет определить состав шихты, обеспечивающий наибольшее содержание магнетита.

Цель. Установить влияние массовой доли добавляемого металлического железа на фазовый состав продуктов термобарического синтеза магнетита из гематитсодержащей окалины.

Материалы и методы

В качестве исходных компонентов использовали металлическую окалину, служащую источником α-Fe_2O_3, и порошок металлического железа Fe. Содержание добавляемого железа составляло 2, 4, 6, 8 и 10 мас. %, содержание окалины соответственно 98, 96, 94, 92 и 90 мас. %. Компоненты перемешивали и прессовали в таблетки. Синтез проводили в аппарате высокого давления типа «наковальня с лункой» при температуре 1100 °С и давлении 5 ГПа. Нагрев до заданной температуры и выдержка продолжались по 1 мин. Температуру, давление и продолжительность обработки во всей серии сохраняли неизменными.

Таблетку размещали в известняковой кювете между танталовыми пластинами. Пространство у боковой поверхности заполняли графитом, сверху и снизу использовали прокладки на основе нитрида бора с графитом. После термобарической обработки фазовый состав образцов исследовали методом рентгеновской дифракции. Полнопрофильное уточнение по методу Ритвельда использовали для определения массовых долей выявленных кристаллических фаз.

Результаты и их обсуждение

Основной фазой во всех пяти образцах являлся магнетит Fe_3O_4, доля которого изменялась от 76,6% до 97,2 %. Вюстит FeO обнаружен во всей серии. Гематит α-Fe_2O_3 выявлен только при добавках 2 и 4 мас. % Fe. При 6, 8 и 10 мас. % Fe рентгенофазовый анализ показал двухфазный состав: магнетит и вюстит. Количественные результаты представлены в таблице 1.

При увеличении добавки железа от 2 до 4 мас. % доля магнетита возрастала с 76,6% до 95,3 %, а содержание гематита снижалось с 22,9% до 2,9 %. Одновременно доля вюстита увеличивалась с 0,4%до 1,9 %. Таким образом, на этом участке составов увеличение содержания Fe сопровождалось преимущественно уменьшением доли гематита и ростом доли магнетита.

Таблица 1. **Массовые доли кристаллических фаз в образцах**

Fe % в исх. смеси мас. %	Fe_3O_4, %	FeO, %	α-Fe_2O_3, %
2	76,6	0,4	22,9
4	95,3	1,9	2,9
6	97,2	2,8	0
8	87,5	12,5	0
10	77,8	22,2	0

Максимальное содержание магнетита, 97,2 мас. %, установлено для шихты с 6 мас. % Fe и 94 мас. % окалины. Доля сопутствующего вюстита составляла 2,8 мас. %, гематит не выявлен. По сравнению с образцом с 4 мас. % Fe содержание магнетита увеличилось на 1,9 процентного пункта.

Заключение

При термобарической синтезе магнетита из металлической окалины и атомарного железа при 1100 °С и 5 ГПа с выдержкой 1 мин получены образцы с преобладанием фазы магнетита. Наибольшая доля Fe_3O_4 среди исследованных образцов, 97,2 мас. %, достигнута для шихты из 94 мас. % окалины и 6 мас. % Fe. Содержание вюстита составило 2,8 мас. %, гематит методом рентгенофазового анализа не выявлен. Дальнейшее увеличение добавки железа сопровождалось ростом доли вюстита и уменьшением содержания магнетита.

Исследования выполнены при поддержке гранта МИЦНТ СНГ №26-104.

1. Legodi, M. A. The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste / M. A. Legodi, D. de Waal // Dyes and Pigments. 2007. Vol. 74, No. 1. P. 161-168. DOI: 10.1016/j.dyepig.2006.01.038.
2. Cornell, R. M. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses / R. M. Cornell, U. Schwertmann. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 664 p. DOI: 10.1002/3527602097.

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗОВАННЫХ ГЕКСАДЕЦИЛТРИМЕТОКСИСИЛАНА И ОКТАДЕЦИЛТРИХЛОРСИЛАНА

Я. С. Игнатович, А. Е. Соломянский

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь, solasy@ichnm.by

Введение

Кремнийорганические соединения известны своим набором ценных свойств: термостойкость, химическая инертность, гидрофобность и устойчивость к ультрафиолету [1]. Благодаря этому они востребованы в самых различных областях — от антикоррозионных добавок в бытовой химии и водоотталкивающих пропиток для одежды до прозрачных защитных покрытий для сенсорных экранов и оптических элементов [1, 2]. Особый интерес представляют покрытия, которые формируют из предварительно гидролизованных органоалкоксисиланов и органохлорсиланов [2]. Нанесённые на подложки и детали различной формы и материалов, они позволяют увеличить краевой угол смачивания водой со значений меньше 90° до более 100°, а также существенно повышают износостойкость трущихся поверхностей в прецизионных узлах трения [1, 2]. Цель данной работы — разработка износостойких гидрофобных покрытий на основе гидролизованных гексадецилтриметоксисилана (г-ГЕМС) и октадецилтрихлорсилана (г-ОТС).

Материалы и методы

Гидролиз гексадецилтриметоксисилана и октадецилтрихлорсилана осуществляли по методикам описанным в [2, 3]. Слои из г-ГЕМС и г-ОТС а также композиционные бислойные покрытия г-ГЕМС/г-ОТС формировали на предварительно гидрофилизированных кремниевых пластинах площадью 1,5 $см^2$ методом центрифугирования [2]. Растворы г-ГЕМС и г-ОТС в гексане с концентрацией 40 мг/мл, г-ОТС наносили на пластины, вращающееся с частотой 3000 об/мин, используя высокоскоростную центрифугу (НПО «Центр», Беларусь) в течение 1 минуты. Бислой г-ГЕМС/г-ОТС получали аналогичным образом формируя слой г-ОТС на подложке с г-ГЕМС. Трибологические испытания образцов в паре трения сталь 95Х18 (сфера) – кремний (плоскость) были произведены на аппарате возвратно-поступательного типа (Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси) при нормальной нагрузке 1,0 Н [2]. Диаметр шарика-индентора 3,0 мм. Линейная скорость скольжения индентора 4,0 мм/с, длина его хода — 3,0 мм. Испытания завершали при достижении коэффициента трения (k_f) ~ 0,40 [2]. Краевой угол смачивания водой (КУС)

образцов определяли методом «лежащей» капли [2]. Изображение капли дистиллированной воды объемом 3 мкл на поверхности покрытий получали с помощью микрокамеры DigiMicroscope и определяли КУС используя программное обеспечение «ImageJ» [3].

Результаты и их обсуждение

Наличие в г-ГЕМС и г-ОТС алкильных радикалов позволяет увеличить КУС гидрофилизированного кремния с ≤ 5° до 107,9±1,6° и 116,3±2,5° при формировании на его поверхности слоев г-ГЕМС и г-ОТС соответственно [2]. Более высокие значения КУС для г-ОТС, в отличие от г-ГЕМС, обусловлены формированием объемных олигомерных островков с протяженными октадецильными радикалами, эффективно изолирующими подложку гидрофильного кремния [1–3]. Значение КУС композиционного бислойного покрытия г-ГЕМС/г-ОТС составляет 105,6 ± 1,3°. Снижение его КУС по сравнению с слоями г-ГЕМС и г-ОТС возможно связано с нарушением плотности упаковки алкильных радикалов и изменением их ориентации при частичном смешении компонентов [1, 2].

В условиях трибоиспытаний разрушение оксидного слоя кремния и увеличение значения k_f кремниевой подложки с 0,25 до 0,40 происходит за один цикл скольжения стального шарика (Рисунок, кривая 1).



Рис. 1 **Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения: кремниевая поверхность (1), кремний/г-ГЕМС (2), кремний/г-ОТС (3), композиционное покрытие кремний/г-ГЕМС/г-ОТС (4)**

При тестировании образцов кремний/г-ГЕМС, кремний/г-ОТС и кремний/г-ГЕМС/г-ОТС k_f увеличивается до значений ~ 0,40 после 40 ± 8, 60 ± 10 и 180 ± 40 циклов скольжения. При этом слои г-ГЕМС, г-ОТС уменьшают k_f кремниевой подложки с 0,25 до 0,11. В случае бислоя г-ГЕМС/г-ОТС значение k_f снижается до 0,10 после приработки узла трения (Рисунок). Различие в износостойкости покрытий г-ОТС и г-ГЕМС может быть связано с увеличением плотности гидрофобного слоя за счет присутствия октадецильного радикала [1]. Улучшение трибологических свойств композита г-ГЕМС/г-ОТС по сравнению со слоями г-ГЕМС и г-ОТС обусловлено тем, что разупорядоченность смешанного алкильного слоя увеличивает его конформационную подвижность, тем самым усиливая смазочные свойства и снижая сопротивление сдвигу [1, 2].

Выводы

Установлено, что композиционные бислойные покрытия г-ГЕМС/г-ОТС, полученные на кремниевой подложке методом центрифугирования, обладают повышенными трибологическими характеристиками по сравнению со слоями из г-ОТС и г-ГЕМС, сохраняя

относительно высокую гидрофобность. Разработанные гидрофобные покрытия перспективны для предотвращения износа деталей в прецизионных узлах трения.

1. Wynne, K. J. Silicones / K. J. Wynne, J. M. Lambert // Springer Handbook of Functional Polymers / ed. Y. Chujo. – Singapore: Springer, 2025. – P. 353–372.
2. Гидрофобные покрытия на основе органоалкоксисиланов / В.М. Акулова [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 130-135.
3. Композиционные покрытия из полиуретана, оксида цинка, полианилина и олигомеров октадецилтрихлорсилана/ А. В. Калютик [и др.] // Полимерные материалы и технологии. –2026. – Т. 12 – № 1. – С. 66–70.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРМИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

М.В. Карсакова, И.С. Шилько

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси: marinakarsakova686@gmail.com, Гомель, Беларусь

Цель

Сверхмолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) благодаря уникальным физико-механическим свойствам является одним из наиболее востребованных на современном рынке конструкционным полимером [1]. В то же время, создание композиционных материалов на его основе остается недостаточно разработанным направлением [2]. Целью исследования было установление зависимости основных механических и электрических характеристик СВМПЭ от концентрации, введенного в него углеродного волокна на основе полиакрилонитрила (ПАН-УВ).

Материалы и методы

Объекты исследования: широко представленные на международном рынке СВМПЭ марки GUR 4120 молекулярной массой $5 \cdot 10^6$ г/моль и мелкодисперсное ПАН-УВ марки ZOLTEK PX35 MF0150, применяемое для армирования полимерных композитов с целью повышений механических характеристик и получения рассеивающих статическое электричество материалов. Образцы получали смешиванием порошка СВМПЭ с УВ на вибрационной мельнице Retsch MM 200 с последующим прессованием смеси при температуре 180±10 ºС и давлении 20 МПа. Механические характеристики определяли на испытательной машине Shimadzu Autograph AGS-1 kNX по ГОСТ 14236 на образцах толщиной 0,8±0,1 мм, удельное объемное электрическое сопротивление с помощью мегаомметра Е6-32 по ГОСТ 6433.2 на образцах толщиной 2 мм.

Результаты и их обсуждение

Изменение удельного объемного электрического сопротивления СВМПЭ с увеличением концентрации ПАН-УВ в полимерной матрице представлено на рис. 1. Установлено, что антистатические свойства композитом достигаются при введении более 5 масс. % ПАН-УВ, а при концентрации 10 масс. % сопротивление уменьшается до значений близких к электропроводящим материалам (менее 10^5 Ом·м).

Однако, возрастание прочности на 35 % (при 20 масс. %) сопровождается почти 4-х кратным снижением относительного удлинения. Исходя из установленного характера зависимостей (возможность потери материалом пластичности) следует вывод о

необходимости выбирать необходимую концентрацию волокон в зависимости от конкретного назначения и условий использования композита.

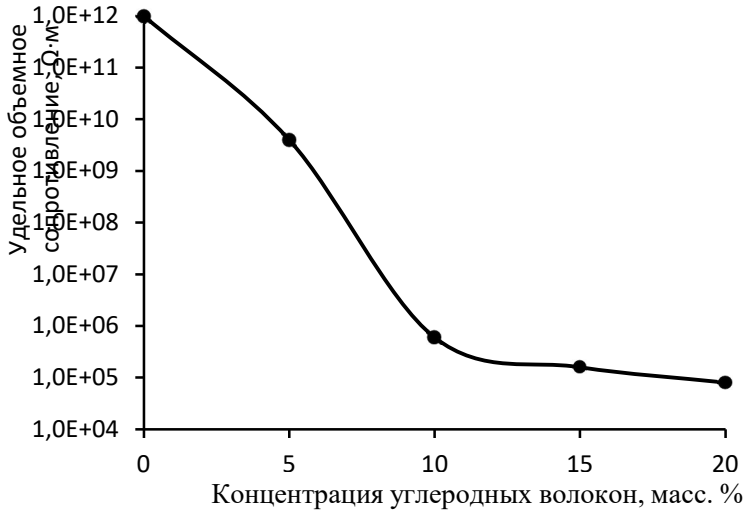


Рис. 1. **Зависимость удельного объемного электрического сопротивления СВМПЭ от концентрации углеродных волокон**

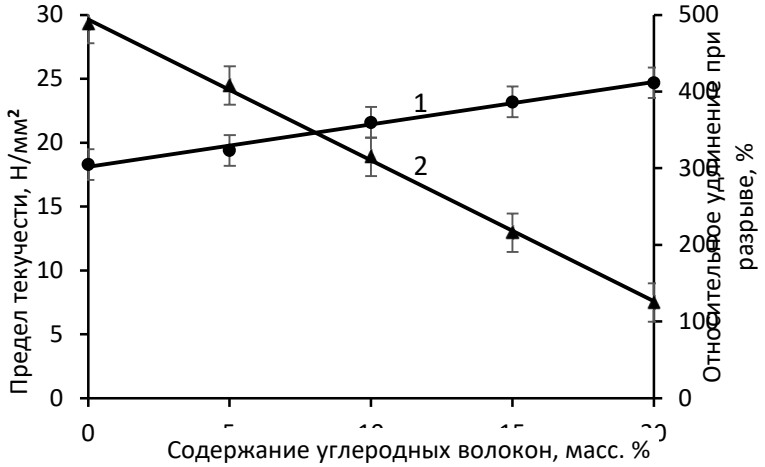


Рис. 2. **Зависимость предела текучести (1) и относительного удлинения при разрыве СВМПЭ от концентрации углеродных волокон**

Также зафиксировано некоторое повышение ударной прочности армированного СВМПЭ при введении 10 масс. % ПАН-УВ. Испытания по методу Гарднера (ASTM D5420) показали увеличение энергии разрушения с 20 до 22 Дж.

Заключение

Показано, что при армировании СВМПЭ мелкодисперсным ПАН-УВ оптимальным комплексом механических и электрических характеристик при использовании по общетехническому назначению обладает композит с содержанием волокон в полимерной матрице около 10 масс. %. При данной концентрации предел текучести СВМПЭ повышается на 20 %, а ударная прочность на 10 % при сохранении высоких значений относительного удлинения при разрыве (более 300 %). Причем удельное объемное электрическое сопротивления данного композита снижается до значений близких токопроводящим материалам, что позволяет эффективно рассеивать статические заряды и, следовательно, использовать его в ответственных электронных узлах. Увеличение концентрации ПАН-УВ более 10 масс. % при не значительном

увеличении прочности и электропроводности приводит к удорожанию конечного продукта и потери им пластичности.

1. Валуева М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ — 2020 (**87**), № 3, 49—57.
2. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Г.Е. Селютин [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. — 2010, № 3, 375—388.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ

М.А. Коваленко

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

Введение

В современной индустрии композиционных материалов создание тонкостенных волокнисто-пористых структур с регулируемыми эксплуатационными свойствами является актуальной научно-технической задачей. Такие системы востребованы в качестве высокоэффективных фильтрующих элементов, сорбентов, звуко- и теплоизоляционных барьеров, а также элементов биомедицинского назначения. Традиционный метод получения нетканых материалов по технологии *meltblowing* (аэродинамическое распыление расплава) обладает высокой производительностью, однако формование изделий со строго заданными физико-механическими параметрами и высокой степенью дисперсности наполнителя требует модернизации, так технологического процесса, так и материального состава [1-3]. В настоящей работе разработана методика, объединяющая наноструктурное модифицирование полимерной матрицы и оптимизацию гидродинамических режимов воздушного потока для получения тонкостенных композиционных волокнисто-структурных систем с повышенными прочностными характеристиками.

Цель работы

Целью исследования является разработка и научно-технологическое обоснование методики формирования тонкостенных композиционных волокнисто-пористых систем с улучшенными показателями физико-механических характеристик.

Материалы и методы

В качестве базовой полимерной матрицы был выбран низкотекучий полипропилен (ПП) с показателем текучести расплава (ПТР) 3 г/10 мин. Выбор материала обусловлен проведёнными ранее экспериментами, доступностью и необходимостью обеспечения необходимой вязкости расплава для контролируемой вытяжки макроволокон. Для повышения прочностных характеристик системы применен нанонаполнитель — органомодифицированная наноглина (органомонтмориллонит, ММТ, торговая марка «Монамет»). С целью улучшения совместимости фаз, интенсификации процесса диспергирования наноглины в вязком расплаве полимера, а также в качестве технологической пластифицирующей добавки в систему вводился стеарат цинка.

Технологический процесс получения изделий

Разработанная методика включает пять последовательных этапов, сочетающих материальную подготовку и настройку оборудования.

Этап 1. Предварительное механическое смешение компонентов. На первом этапе осуществляется сухое механическое смешивание гранулированного ПП, порошка наноглины ММТ и стеарата цинка. Предварительное смешение производилось в высокоскоростном смесителе. Далее смесь загружалась непосредственно в бункер одношнекового экструдера без использования сложных систем дозирования, что упрощает технологическую схему при мелкосерийном производстве.

Этап 2. Смешение и гомогенизация в экструдере. Для обеспечения высокого качества диспергирования наноглины в полипропиленовой матрице стандартное оборудование было модернизировано. В отличие от традиционного для пневмоэкструзии оборудования с отношением длины шнека к его диаметру L/D = 20, в данной методике применен экструдер с увеличенным значением L/D = 30. Это позволило увеличить время пребывания материала в материальном цилиндре, оптимизировать площадь обогрева массы, обеспечить максимальные сдвиговые деформации и достичь смешанной эксфолиации (расслоения) наноглины в объеме полимера.

Этап 3. Подбор давления распыляющего воздуха и эволюция факела расплава. Давление распыляющего воздуха является ключевым фактором, определяющим геометрию факела распыления и внутреннюю структуру *Melt-Blown* изделия. При использовании однофильерных головок процесс структурирования факела разделяется на две зоны.

1) Зона малых давлений (турбулентное формирование нити): на этом этапе формируется единая непрерывная («бесконечная») полимерная нить. Её геометрические параметры качественно рассчитываются на основе стандартных уравнений гидродинамики волокнообразования. С ростом давления воздуха в этой зоне полидисперсность (разброс толщин) волокон в готовом изделии увеличивается. Границей этапа является достижение критического числа Вебера (We, значения давления), характеризующего соотношение сил инерции воздушного потока и сил поверхностного натяжения расплава.

2) Зона повышенных давлений (переход к квазиламинарному течению): при вынужденном увеличении давления воздуха выше критического числа Вебера характер потоков меняется. Из одной первичной нити расплава, выходящей из фильеры, формируется множество ультратонких полимерных волокон. Их количество и итоговое сечение напрямую зависят от давления воздуха и свойств материала. Учитывая тот факт, что формирование изделия происходит при помощи одноотверстной фильерной головки, часть потока расплава, контактирующая со стенками фильеры, может претерпевать дополнительный сдвиговый нагрев за счет сил трения. Соответственно эти условия способствуют формированию градиента реологических свойств материала. При высокой производительности экструдера, а также сильной скорости вытяжки локальный перегрев приводит к выраженному градиенту вязкости. В результате формируется выраженное распределение волокон по толщине в зависимости от их пространственного положения в потоке.

Этап 4. Настройка режимов укладки волокон на оправку. Экспериментально установлено, что формирование бездефектной структуры возможно при соблюдении оптимального кинематического критерия формования. Соотношение линейной скорости перемещения оправки к частоте ее вращения должно находиться в пределах от 0,5–1,25 см/сек к 2 об/сек. Нарушение этого баланса (превышение указанных параметров) ведет к образованию следующих технологических дефектов: из-за недостаточной скорости съема волокон (низкая скорость вращения и/или перемещения) происходят локальные слипания не успевшего остыть расплава, данный дефект проявляется в виде капель, и оплавления. Напротив, увеличение скоростных режимов (выше заданных пределов) приводит к неравномерности толщины стенки приводит к появлению слабых зон с низкой механической прочностью, а очаговая пористость нарушает сплошность и фильтрационные свойства материала.

Этап 5. Однослойное нанесение массы. Главной технологической особенностью предлагаемого метода, отличающей его от классических схем *Melt-Blown*, является

однослойное нанесение волокнистой массы. Формирование заданной толщины изделия осуществляется всего за один проход технологической оправки вдоль факела расплава. Это исключает межслойную деламинацию (расслоение) и обеспечивает изотропность свойств материала по всей толщине стенки.

1. Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials / L. S. Pinchuk, V. A. Goldade, A. V. Makarevich, V. N. Kestelman. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2002. – 411 p.
2. Fundamentals and Applications of Micro- and Nanofibers / A. L. Yarin, B. Pourdeyhimi, S. Ramakrishna. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 414 p.
3. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы : монография / А. Г. Кравцов [и др.] ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 319 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФЛОГИИ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АПУ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОАКТИВИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

М.А Коротченя

Физико-технический институт НАН, Минск, Беларусь

Алмазоподобные углеродные (АПУ) покрытия являются широко распространенными тонкопленочными материалами и применяются в различных высокотехнологических устройствах благодаря комплексу уникальных свойств. К ним относится твердость, близкая к твердости натурального алмаза, низкий коэффициент трения и необыкновенно высокая износостойкость, химическая инертность к кислотам и щелочам, прозрачность в инфракрасном спектре, биологическая совместимость с тканями организма, возможность получения нанокомпозиционных материалов на основе углеродной матрицы и ряд других свойств, важных для различного рода применений [1]. В настоящее время они широко используются в промышленности, потому требуется все более новые совершенные и дешевые методы осаждения АПУ покрытий.

Для населения АПУ покрытия использовался CVD метод электронноактивируемого осаждения из газовой фазы (EECVD). Более детальное описание метода приводится в работах [2, 3]. Для реализации этого метода разработаны специальные устройства для разделения плазмы на электронную и ионную составляющую. С помощью электронной составляющей происходила декомпозиция и активация реакционного углеводородного газа, как источника углерода для получения алмазоподобного покрытия. Источником самой плазмы была дуга на титановый катоде при токе 55 А. Для предотвращения попадания расплавленных капель титана в область растущей пленки использовалась система магнитной сепарации.

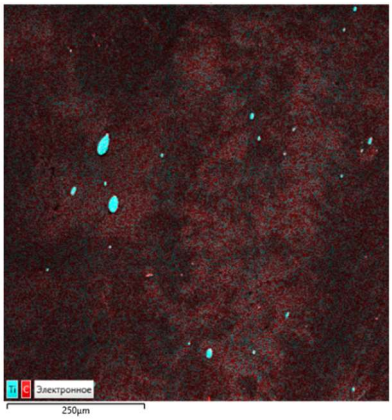


Рис. 1 **Карта распределения химических элементов в АПУ покрытии**

Методами энергодисперсионной спектроскопии было установлено, что превалирующим элементом покрытия является углерод (свыше 96 – 99 ат.%), с небольшим содержанием титана (около 1 – 4 ат.%). При этом содержание титана немонотонно изменялось с увеличением напряжения смещения с минимумом его содержания около 1.1%, при напряжении смещения -80 В. На рисунке 1 показана карта распределения элементов, созданная с помощью программы AZtec software. За исключением некоторых микрообластей, представляющие собой застывшие мкирокапли титана. Наличие титана в покрытии главным образом обусловлено микрочастицами титана, эжектируемыми из поверхности катода. Анализ поверхности АПУ покрытий показывает закономерное увеличение макрочастиц с увеличением давления ацетилена, что интенфицирует горение дуги и эжекцию микрокапель.

Учитывая то, что АПУ покрытия получаются из углеводородов велика вероятность наличия в их составе водорода, как это имеет место в покрытиях полученных PECVD методом, для которых содержание водорода составляет 20 – 60 ат.%. Водород существенным образом влияет на свойства АПУ покрытий. Он может образовывать химические связи с углеродом типа sp^2 и sp^3, и зачастую выступает в качестве терминирующего элемента, насыщающего оборванные углеродные связи. В покрытиях, полученных методом EECVD, водород детектируется на уровне 0,01 – 0,06 ат.%, т.е. на уровне фона, как это было установлено методом методами эмиссионной спектроскопии с использованием прибора Horiba GD-profiler 2. Это означает, что происходит полная деструкция реакционного газа и осаждаемые покрытия являются безводородными и относится к типу a-C [4].

При этом полная деструкция и дегидратация не свойственна обычным CVD методам осаждения покрытий. Это существенным образом выделяет данный метод среди прочих.

Было выполнение исследование поверхности АПУ покрытий с методами атомно-силовой микроскопии. Для области сканирования 28×28 мкм^2 параметры шероховатости Ra и Rq составили 2,1 нм и 4,5 нм соответственно и близки к шероховатости основы – полированного монокристалла кремния.

Выводы:

Методом электронноактивируемого осаждения из газовой фазы получены безводородные АПУ покрытия, с содержанием титана не превышающим 4 ат.%. По результатам АСМ-исследований покрытие характеризуется высокой гладкостью поверхности. В дальнейшем будут проведены исследования механические и трибологические характеристик АПУ покрытия.

1. Rajak, D. K., Kumar, A., Behera, A., & Menezes, P. L. Diamond-like carbon (DLC) coatings: classification, properties, and applications. // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. - N.- 10. - P 4445-4465.

2. Коротченя, М. А. Нанесение DLC покрытий методом PECVD / М. А. Коротченя; науч. рук. В. М. Комаровская // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке : материалы республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов (25-26 ноября 2021 г.) / редкол.: А. М. Маляревич (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 250-251.
3. Чекан Н.М., Коротченя М.А., Акула И.П., Сергеенко С.Е., Хома М.Ю., Шпак Е.П. Алмазоподобные углеродные покрытия, полученные методом электронноактивируемого химического осаждения / Сборник научных трудов ФТИ НАН Беларуси «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», 2026, т. 2 – принято к публикации.
4. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon //Materials science and engineering: R: Reports. – 2002. – Т. 37. – №. 4-6. – С. 129-281.

СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОПРОВОЛОК NiFeCu В МАТРИЦАХ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.Н. Котельникова, А.А. Роткович, А.А. Зубеня, С.А. Герман, В.А. Федькин, Н.Е. Андрейчик, Т.И. Зубарь

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск, Республика Беларусь, anna.kotelnikova.98@mail.ru

Введение

Электрохимическое осаждение сплавов группы железа в каналы пористого анодированного оксида алюминия (ПАОА) — эффективный метод получения квазиодномерных наноструктур, включая многослойные нанопроволоки с чередующимися магнитными и немагнитными слоями [1]. Варьирование потенциала осаждения позволяет направленно изменять состав сплава по длине нанопроволок и формировать градиентные структуры, характер распределения элементов в которых определяется составом электролита и параметрами подложки [2, 3], а контроль состава по глубине материала актуален как для плёночных, так и для одномерных структур сравнимого состава [4]. Кристаллическая структура твёрдого раствора NiFe чувствительна к условиям электроосаждения, поэтому воспроизводимость режима осаждения – ключевой фактор получения материала с заданными свойствами. Целью работы являлась разработка и апробация режимов синтеза градиентных и многослойных нанопроволок NiFeCu в матрицах ПАОА и подтверждение соответствия их состава и структуры заданным параметрам осаждения.

Материалы и методы

В качестве ростовой матрицы использовали ПАОА (диаметр пор 90±10 нм, период 145±15 нм, толщина 80–85 мкм). Для контакта на одну сторону матриц напыляли слой никеля, изолированный химически стойким лаком. Осаждение проводили из сульфатного комбинированного электролита при 35 °С и перемешивании; анодом служила никелевая пластина в химически стойкой ткани. Управление режимом осуществляли на потенциостате-гальваностате Р-45Х.

Параметры осаждения приведены в табл. 1. Образец М-1 получен в режиме линейного снижения потенциала от -1,1 до -1,3 В (120 мин). Образцы М-2 и М-3 осаждали в трёхслойном ступенчатом режиме NiFe/Cu/NiFe, различающемся потенциалом третьего слоя (-1,2 и -1,3 В соответственно). Образец М-4 получен в пятислойном режиме NiFe/Cu/NiFe/Cu/NiFe с идентичными слоями NiFe и Cu.

Таблица 1. **Параметры осаждения образцов М-1–М-4**

Образец	**Потенциал *U*, В**	**Время *t*, мин**	**Структура**
М-1	-1,1 → -1,3 (линейно)	120	Линейный градиент NiFe
М-2	-1,2 / -0,6 / -1,2	30 / 15 / 30	3 слоя, идент. NiFe
М-3	-1,2 / -0,6 / -1,3	30 / 15 / 30	3 слоя, разные NiFe
М-4	-1,2/-0,6/-1,2/-0,6/-1,2	20/10/20/10/20	5 слоёв NiFe/Cu

Соответствие состава и структуры нанопроволок заданным режимам осаждения подтверждали методами ЭДС (AZtec Xplore, Oxford Instruments), рентгеновской дифрактометрии (ADANI POWDIX 600/300, Cu-Kα, 2θ = 40–100°) и СЭМ (SM-20, Melytech). Для анализа состава и размеров нанопроволок, части образцов были протравлены в 1М NaOH.

Результаты и их обсуждение

Полученные зависимости потенциала и плотности тока от времени осаждения (рис. 1) подтверждают стабильную реализацию заданных программ электролиза: при переключении на потенциал осаждения Cu (–0,6 В) наблюдается характерный скачок плотности тока, а на стадиях осаждения NiFe она плавно снижается по мере роста нанопроволок вследствие увеличения диффузионных ограничений.

Толщина полученных композитов (77–84 мкм) близка к толщине исходных матриц ПАОА (80–85 мкм), что свидетельствует о практически полном заполнении пор нанопроволоками по всей их высоте независимо от режима осаждения.

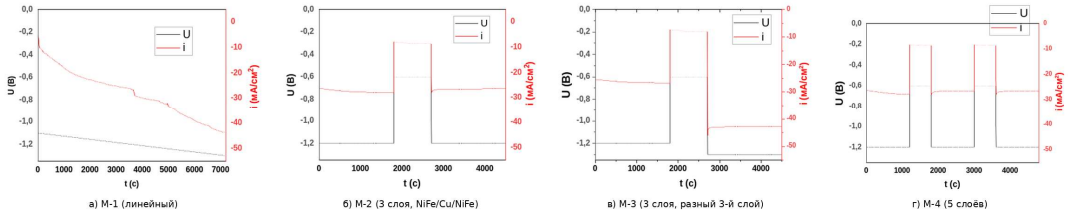


Рис. 1. **Экспериментальные зависимости потенциала *U* и плотности тока *i* от времени осаждения *t* для образцов М-1 (а), М-2 (б), М-3 (в) и М-4 (г)**

Анализ химического состава подтвердил соответствие структур заданным режимам: содержание Cu в дендритах М-1 составило 2,4 ат.%, тогда как в многослойных М-2–М-4 (со стадией осаждения меди) – 3,6–3,9 ат.%. Профилирование по глубине выявило для М-1 монотонное повышение Ni и снижение Fe вдоль роста нанопроволоки; для М-2 и М-3 – область повышенного Cu на глубине 15–16 и 15–16,5 мкм, для М-4 – две такие области (10–11 и 22–23 мкм), что точно соответствует заданному положению медных прослоек.

Дифрактограммы всех образцов демонстрируют рефлексы (111), (200), (022), (131), (222) ГЦК-решётки Ni без отдельных рефлексов Fe или Cu, что указывает на формирование твёрдого раствора замещения этих элементов в решётке никеля; ОКР составил 13±1 нм, параметр ячейки – 3,56–3,57 Å для всех образцов вне зависимости от режима осаждения.

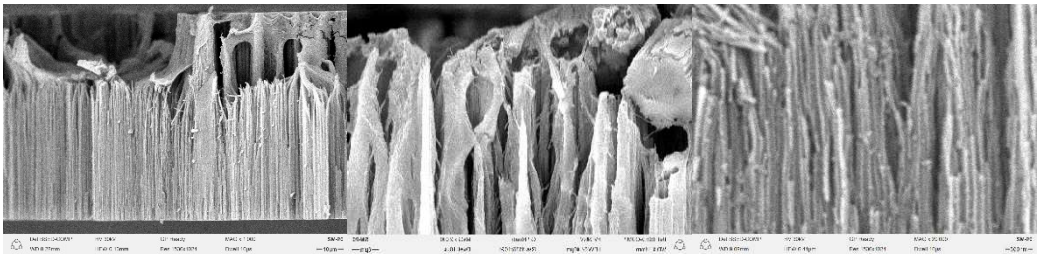


Рис. 2. **Электронные снимки протравленного в 1М NaOH образца М-1**

Электронная микроскопия (пример на рис. 2) подтвердила формирование нанопроволок диаметром 105–110 нм (соответствует диаметру пор матрицы) во всех образцах; основная часть агломератов имела высоту 50–60 мкм, а немногочисленная фракция более высоких (до 75–80 мкм) связана с ускоренным ростом в порах повышенного диаметра.

Выводы

Разработан и апробирован подход к синтезу градиентных и многослойных нанопроволок NiFe(Cu) в матрицах ПАОА варьированием потенциала осаждения в пределах одного электролита. Линейное снижение потенциала от –1,1 до –1,3 В формирует непрерывный градиент состава, а чередование потенциалов –1,2(–1,3) и –0,6 В – трёх- и пятислойные структуры NiFe/Cu/NiFe(/Cu/NiFe) с Cu-прослойками на заданной глубине. Характеризация подтвердила соответствие нанопроволок заданным режимам: диаметр 105–110 нм, однофазную ГЦК-структуру NiFe(Cu) и точное положение Cu-прослоек.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф23РНФМ-059).

1. Development of Ni80Fe20/Cu nanocrystalline composite wires by pulse-reverse electrodeposition / H. L. Seet [et al.] // J. Alloys Compd. – 2008. – Vol. 449, № 1–2. – P. 279–283.
2. Composition gradient, structure, stress, roughness and magnetic properties of 5–500 nm thin NiFe films obtained by electrodeposition / J. Gong [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 64–69.
3. Białostocka, A. M. The effect of a substrate material on composition gradients of Fe-Ni films obtained by electrodeposition / A. M. Białostocka, U. Klekotka, B. Kalska-Szostko // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 1029.
4. Features of Galvanostatic Electrodeposition of NiFe Films with Composition Gradient: Influence of Substrate Characteristics / T. I. Zubar [et al.] // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, № 17. – P. 2926.

УПРАВЛЕНИЕ ГРАДИЕНТОМ СОСТАВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЁНОК NiFeCu МЕТОДОМ ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ

А.Н. Котельникова, А.А. Роткович, А.А. Зубеня, С.А. Герман, В.А. Федькин, Н.Е. Андрейчик, Т.И. Зубарь

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск, Республика Беларусь, anna.kotelnikova.98@mail.ru

Введение

Плёночные покрытия на основе сплавов NiFe и NiFeCu с управляемым распределением состава по толщине сочетают магнитомягкие свойства с возможностью тонкой настройки функциональных характеристик: изменение профиля состава – от плавного до резко ступенчатого — позволяет получать материалы с заданными магнитными параметрами для чувствительных элементов датчиков, компонентов микросистемной техники и защитных покрытий повышенной коррозионной и износостойкости [1, 2]. Введение меди в систему NiFe изменяет параметр решётки и характер дефектообразования, отражаясь на морфологии зёрен, фазовом составе и, как следствие, на магнитных и механических характеристиках покрытия [3]. Воспроизводимое управление содержанием Ni, Fe и Cu по глубине плёнки остаётся ключевой задачей при отработке технологии осаждения градиентных и слоистых структур. Целью работы являлось получение плёнок NiFeCu с линейным, ступенчатым и слоистым распределением состава варьированием потенциала осаждения в пределах одного электролита, без смены рабочего раствора.

Материалы и методы

Осаждение плёнок проводили из комбинированного сульфатно-хлоридного электролита объёмом 2,5 л (табл. 1) при температуре 35 °C и pH 2,4; перемешивание и подогрев раствора обеспечивались магнитной мешалкой с термодатчиком и барботированием воздуха.

Таблица 1. **Состав электролита осаждения**

Компонент	Концентрация, г/л
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	256
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	20
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	13
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	2
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	90
H_3BO_3	30
Сахарин ($C_7H_5NO_3S$)	2
Сульфосалициловая к-та ($C_7H_6O_6S$)	1,745

Рабочие потенциалы выбирали по данным поляризационной кривой электролита: при -0,4 В восстанавливаются только ионы меди без включения Ni и Fe, тогда как в диапазоне -1,0 – -1,3 В формируется сплав NiFe переменного состава – соотношение Ni/Fe и содержание примеси Cu изменяются вместе с потенциалом. Подложками служили пластины Si (100) с напылённым слоем Au.

Три образца плёнок получали при различных временных профилях потенциала (рис. 1, а): образец 1 – линейная развёртка от -1,0 до -1,3 В (0,7 мВ/с, 420 с), формирующая непрерывный линейный градиент состава; образец 2 – ступенчатое понижение потенциала с шагом 0,05 В и выдержкой 60 с на ступени; образец 3 – тот же ступенчатый профиль со вставками потенциала -0,4 В (120 с) между ступенями, формирующими многослойную структуру NiFe/Cu/NiFe/…/NiFe из семи слоёв NiFe и шести прослоек Cu.

Массу реагентов и pH контролировали весами Libra VK-1 (Massa-K) и pH-метром Hanna 2210 (Hanna Instruments). Осаждение проводили на потенциостате-гальваностате P-45X (Electrochemical Instruments) под управлением ПО ES8. Химический состав плёнок определяли методом ЭДС (AZtecLive Advanced, детектор Ultim Max 40, Oxford Instruments) с обеих сторон отделённых плёнок и по сколам (охлаждение в жидком азоте с разломом) – для профиля распределения элементов по толщине.

Результаты и их обсуждение

Профили состава по толщине подтвердили ожидаемый характер градиента для всех трёх образцов (рис. 1, б–г). Сторона плёнки, прилегавшая к подложке (рост при -1,0 В), содержала меньше Ni и больше Fe и Cu, чем сторона, сформированная последней (при -1,3 В): по мере смещения потенциала в отрицательную область содержание Ni возрастало, а Fe и Cu – снижалось, причём характер изменения (плавный, ступенчатый или блочный) точно воспроизводил заданный временной профиль потенциала.

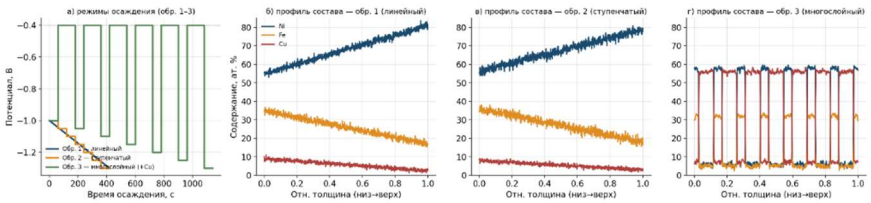


Рис. 1. **Режимы осаждения образцов 1–3 (а) и профили изменения элементного состава плёнок по толщине для образцов 1 (б), 2 (в) и 3 (г)**

Такое поведение соответствует известной для NiFe аномальной кинетике соосаждения: при менее отрицательных потенциалах доля Fe в сплаве повышается, а Ni осаждается интенсивнее при более отрицательных значениях; конкуренция ионов Cu, Ni и Fe за восстановление смещается в пользу Ni и Fe с ростом перенапряжения, что при низкой концентрации источника меди ограничивает её включение в плёнку.

Образец 3 отличался повышенным содержанием Cu и сниженным содержанием Ni и Fe на обеих сторонах вследствие чередования тонких слоёв NiFe и Cu: электронный пучок при ЭДС-анализе захватывает сигнал соседних слоёв, «размывая» их вклад в спектр, – по этой же причине сигнал Cu-прослоек проявляется уширенными пиками пониженной интенсивности.

Выводы

Показано, что варьирование потенциала осаждения в пределах одного электролита NiFeCu позволяет получать плёнки с линейным, ступенчатым и многослойным градиентом состава без смены рабочего раствора. Понижение потенциала от -1,0 до -1,3 В повышает содержание Ni (до 80,7 ат.%) и снижает содержание Fe (до 16,8 ат.%) и Cu (до 2,3 ат.%) в верхних слоях; низкое содержание меди (2,3–2,9 ат.%) в слоях NiFe важно для сохранения их магнитомягких свойств, что делает подход перспективным для получения функциональных градиентных покрытий из единого электролита.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Х24М-009).

1. Features of Galvanostatic Electrodeposition of NiFe Films with Composition Gradient: Influence of Substrate Characteristics / T. I. Zubar [et al.] // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, № 17. – P. 2926.
2. Influence of surface roughness and current efficiency on composition gradients of thin NiFe films obtained by electrodeposition / I. Tabakovic [et al.] // J. Electrochem. Soc. – 2014. – Vol. 162, № 3. – P. D102.
3. Composition gradient, structure, stress, roughness and magnetic properties of 5–500 nm thin NiFe films obtained by electrodeposition / J. Gong [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 64–69.

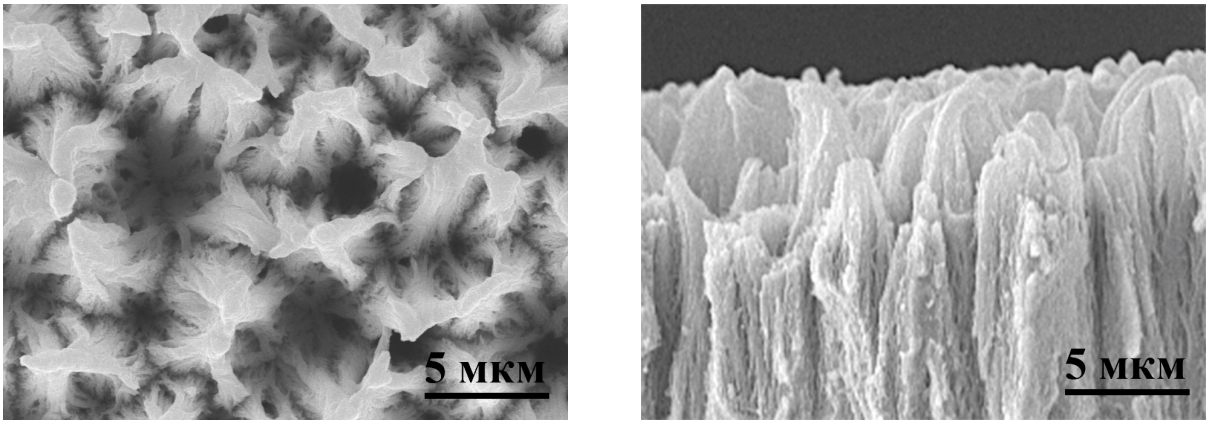
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЙ Ni–P В ДИАПАЗОНЕ 25–37,5 ГГЦ

А.А. Крол[1,2], Ф.А. Зверев[1,2], С.С. Перевозников[1]

[1]Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь

[2]Химический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Стремительное развитие беспроводных технологий связи в полосе частот 25–37,5 ГГц и радарных систем миллиметрового диапазона обостряет проблему электромагнитной совместимости электронных компонентов. Защита прецизионной аппаратуры от взаимных наводок требует создания принципиально новых радиопоглощающих материалов. Традиционные поглотители, например, на основе тяжелых ферритов, малоэффективны в данном СВЧ-диапазоне из-за жестких требований к весу, толщине и геометрическому профилю современных устройств. Ранее было показано, что электрохимически осажденные покрытия Ni–P после травления в азотной кислоте являются эффективными поглотителями электромагнитного излучения видимого диапазона за счет разветвленной микроморфологии поверхности [1]. Также было показано, что такие покрытия обладают значительным поглощением в терагерцовом диапазоне частот [2].



а б

Рис. 1. **Изображения сканирующей электронной микроскопии поверхности (а) и поперечного скола (б) покрытия Ni–P после травления в растворе азотной кислоты со стравливанием 9,1 мг/см^2 покрытия**

Цель исследования – изучение поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 25–37,5 ГГц электроосажденными покрытиями Ni–P после их кислотного травления.

Материалы и методы

Осаждение покрытия Ni–P проводили в гальваностатическом режиме на 5 медных пластинах размером 20 на 35 мм, толщиной 1,5 мм до достижения толщины покрытия 15, 30, 50, 75 и 180 мкм. Содержание фосфора в покрытии составило 3 масс. %. После осаждения покрытия подвергали травлению в 3,5 М растворе азотной кислоты при 55 °С в течении времени, при котором с поверхности стравливалось 3,3, 6,0, 9,1, 14,5 и 25,7 мг/см^2 покрытия. Микроморфологию поверхности покрытия после травления исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Leo 1410 с ускоряющим напряжением 20 кэВ. Измерение коэффициента отражения S11 электромагнитного излучения образцов, выполнялось волноводным методом с использованием векторного анализатора цепей Anritsu MS4644B и двух волноводно-коаксиальных переходов ВКП-7,2×3,4.

Результаты и их обсуждение

Электрохимическое осаждение покрытий Ni–P проводили в присутствии в электролите серосодержащей добавки, в результате чего в покрытие включается небольшое количество серы (около 0,1 масс. %). Сера, являясь мощным промоутером питтинговой коррозии никелевых покрытий, приводит к сильному разрыхлению поверхности при травлении в растворе азотной кислоты с формированием регулярной структуры, состоящей из конических элементов. Размер конических элементов и расстояние между ними можно регулировать длительностью травления в азотной кислоте. На рис. 1 приведены микрофотографии покрытия Ni–P толщиной 50 мкм, подвергнувшегося травлению в течение 270 с при котором с поверхности стравилось 9,1 мг/см^2 покрытия. Диаметр конусообразных элементов составляет 4–6 мкм, глубина травления (высота конусов) – 20–25 мкм. Ранее было установлено, что сформировавшиеся при травлении конусы имеют композитную структуру и состоят из наночастиц фосфидов никеля, распределенных в матрице гидратированных фосфатов никеля. Такая структура из проводящих наночастиц в диэлектрической матрице является эффективной ловушкой для излучения видимого диапазона.

Для изучения поглощения в миллиметровом диапазоне были получены поверхности при различной длительности травления, результаты измерений приведены на рис. 2.

Установлено, что с увеличением длительности и глубины травления происходит увеличение интенсивности поглощения электромагнитного излучения. Для образцов с малой длительностью обработки (кривые *1* и *2*) ослабление сигнала носит локальный характер и не превышает –2 дБ из-за недостаточной высоты рельефа. С увеличением глубины травления

(кривые *3* и *4*) пики поглощения вырастают до –2,5 дБ и –4 дБ, смещаясь в область 32–33 ГГц по мере формирования выраженных конусов. Для образца 5 спектр кардинально меняется, приобретая выраженный мультирезонансный характер. Наблюдаются три интенсивных минимума на частотах 25,8 ГГц, 28,7 ГГц и 35,0 ГГц. Такой эффект обусловлен возникновением множественных интерференционных и геометрических резонансов СВЧ-волн в глубоких межконусных пространствах, а также синергетическим затуханием энергии в композитной наноструктурированной матрице.

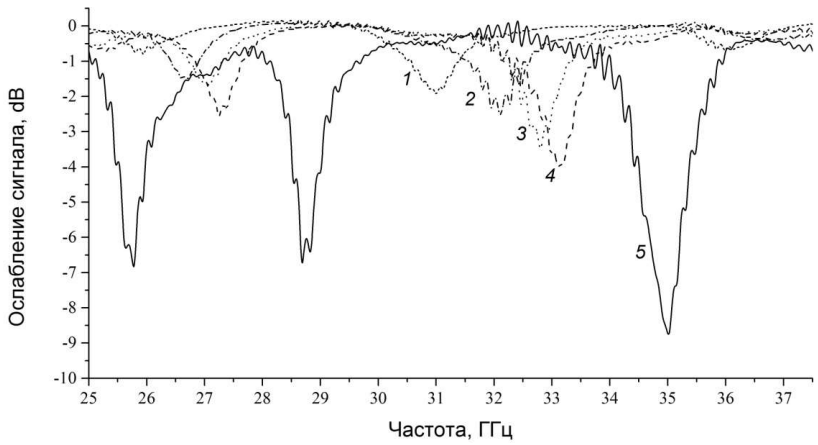


Рис. 2. **Частотные зависимости коэффициента отражения S11 покрытий Ni–P с различной степенью травления (мг/см^2): 3,3 – *1*, 6,0 – *2*, 9,1 – *3*, 14,5 – *4* и 25,7 – *5*.**

Разработанные покрытия Ni–P обеспечивают поглощение до 87 % энергии ЭМИ с частотой 35,0 ГГц, что делает их перспективными материалами для защиты элементов современной микроэлектроники.

1. Perevoznikov S. S. et al. Microstructure, composition and formation mechanism of ultra-black surfaces on the electrodeposited nickel-phosphorous coatings // Surfaces and Interfaces. – 2022. – Vol. 32. – 102127.
2. Menon A., et al. Black Nickel Coating as a Broadband Terahertz to Deep-Ultraviolet Absorber // ACS Omega. – 2026. – Vol. 11. – Iss. 6. – P. 10723 - 10729.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы и технологии», задание 2.1.3.03.

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЙ ОКСИД ITO ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

А.С. Кузьмицкая, В.М. Кравченко, В.В. Малютина-Бронская

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь; mickevichhanna@gmail.com

Тонкая пленка ITO представляет собой сильно вырожденный проводник n-типа с низким удельным сопротивлением (от 2 до $4 \cdot 10^{-4}$ Ом см), широкой запрещенной зоной (от 3,5 до 4,3 эВ) и высокой оптической прозрачностью (до 90%) в видимом спектральном диапазоне, благодаря чему данное соединение широко применяется в различных устройствах оптоэлектроники [1]. В данной работе представлены результаты исследований оптических и электрических характеристик тонких пленок ITO для их возможного применения в качестве высокопроводящих контактов, в том числе солнечных элементов (СЭ) и узкополосных светофильтров с перестраиваемой полосой пропускания за счет встроенного в структуру управляемого нагревательного элемента из тонкой пленки ITO.

Тонкие пленки ITO формировались методом электронно-лучевого напыления в вакууме на

подложках из стекла марки К8 толщиной 1 мм [2]. Контроль процесса формирования осуществлялся параллельно оптическим методом контроля и кварцевыми микровесами, что позволяет формировать высококачественные тонкие пленки различных материалов толщиной от 40 нм с точностью по толщине порядка 1 нм.

Для получения высокопроводящих контактов СЭ на структуре ITO/стекло методом электронно-лучевого напыления формируется многослойная металлизация титан/медь/никель (Ti/Cu/Ni), после чего с помощью позитивной фотолитографии формируется встречно-штыревая структура металлизации (рисунок 1, а) [3]. Структура узкополосного светофильтра на базе резонатора Фабри-Перо с перестраиваемой полосой пропускания (рисунок 1, б) также формировалась методом электронно-лучевого напыления. Устройство состоит из интерферометра Фабри-Перо (1), подложки из стекла К8 (2), прозрачного нагревательного элемента (тонкая пленка ITO) (3), просветляющего слоя (4) [4].



а б

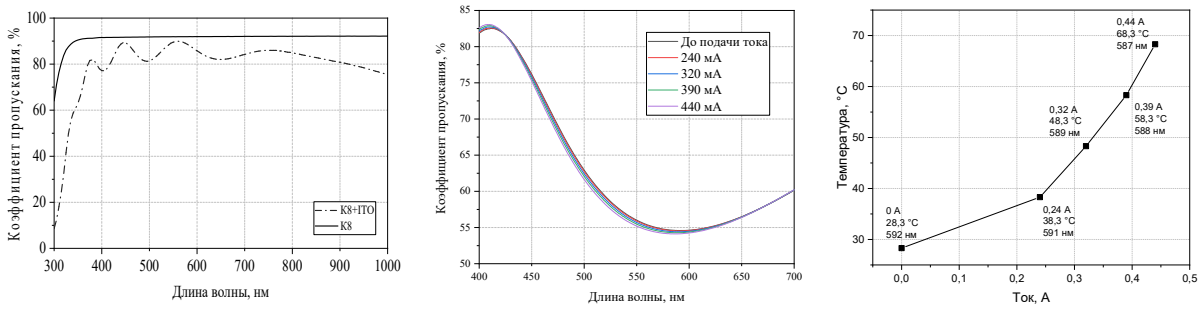
Рис. 1. **Внешний вид экспериментального образца и поперечная структура высокопроводящих контактов для солнечных элементов (а) и перестраиваемого резонатора Фабри-Перо (б)**

Измерение сопротивления пленок ITO осуществлялось на источнике-измерителе Keithley 2450, контроль поверхностного сопротивления плёнок проводилось четырёхзондовым методом на установках ЦИУС-1. Анализ спектров пропускания структуры ITO/стекло проводился на спектрофотометре PHOTON RT. Для проведения измерений термооптических характеристик внутри камеры спектрофотометра к исследуемому образцу подключались электроды для подачи электрического тока с помощью калибратора-измерителя напряжения и тока Keithley 2450, контроль тока, протекающего в исследуемой структуре, проводился с помощью мультиметра GW Instek GDM-8245, контроль температуры – на оптическом пирометре OPTRIS CT.

Сравнение спектров пропускания стекла К8 и исследуемой структуры ITO/стекло (толщина ITO 230 нм) в диапазоне длин волн от 300 нм до 1000 нм представлено на рисунке 2, а. Чистое стекло К8 имеет коэффициент пропускания ≥90% от 350 до 1000 нм, структура ITO/стекло – ≥80 % в диапазоне от 370 до 900 нм. В экспериментальном образце высокопроводящего контакта СЭ сопротивление слоя ITO составляло 25 Ом/см^2, что соответствует характеристикам высокопроводящих прозрачных материалов СЭ. На пленке ITO была сформирована металлизация Ni/Cu/Ti с хорошей адгезией и сопротивлением 0,37 Ом/см^2, что значительно ниже, чем у традиционных систем металлизации. Контактное сопротивление было оценено как $0{,}43 \cdot 10^{-4}$ Ω·см², что на порядок ниже по сравнению с другими системами ITO/металл [5]. Полученные результаты указывают на эффективное снижение омических потерь на контактах СЭ, что также способствует улучшению их производительности.

Для оценки электрооптического эффекта узкополосного перестраиваемого светофильтра исследовалось поведение минимума функции пропускания пленки ITO (толщиной 82,4 нм) на длине волны $\lambda = 592$ нм при пропускании через нее электрического тока в диапазоне от 0 до 440 мА (рисунок 2, б). Было установлено, что с ростом тока от 0 до 440 мА происходит смещение минимума спектра пропускания с 592 до 579 нм ($\Delta\lambda = 13$ нм) и уменьшение значения

коэффициента пропускания на 0,92 %. Также было измерено влияние тока на температуру экспериментального образца фильтра (рисунок 2, в). Показано, что с ростом тока от 0 до 440 мА происходит нагрев образца от 28,3 до 68,3 ºС. Полученные результаты эксперимента представлены в таблице 1.



а б в

Рис. 2. **Спектр пропускания подложки из стекла К8 до и после нанесения тонкой пленки ITO, изменение спектра пропускаия структуры стекло/ITO под воздействием тока (б), изменение температуры структуры стекло/ITO под воздействием тока (в)**

Таким образом полученные результаты показывают практическую значимость отработки технологии синтеза пленок ITO для оптоэлектроники.

1. Weber M. J. Handbook of Optical Materials. — Boca Raton : CRC Press LLC. — 2003.
2. Иванов А., Смирнов Б. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование // НаноИндустрия. 2012 (6), № 36, 28—34.
3. Kravchenko V. M., Malyutina-Bronskaya V. V., Kuzmitskaya H. S., Nestsiaronak A. V. Optically transparent highly conductive contact based on ITO and copper metallization for solar cells // Modern Electronic Materials. — 2024 (10), no. 2, 85—90.
4. Кузьмицкая А. С., Кравченко В. М., Малютина-Бронская В. В. Оптические и тонкослойные материалы на основе оксидов металлов // Молодежь в науке – 2024. — 2024 (2), 191—193.
5. Gheidari M., Soleimani E. A. A study of Al/Ti, Al/Ni/Cr AND Al/Mo ohmic contacts to indium tin oxide (ITO) for application in thin film solar cell // Proceedings of ISES World Congress 2007. — 2007 (I), 1123—1125.

ЭКСТРУЗИОННОЕ КОМПАУНДИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ: ПЕРСПЕКТИВЫ ЦЕЛЕВОГО РЕЦИКЛИНГА

И.А. Ломоносов

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; Igorlomonosov50@mail.ru

Цель

Цель работы — продемонстрировать возможности рециклинга смесей вторичных полиэтилена и полипропилена путем экструзионного совмещения (компаундирования) в присутствии технологических добавок, наполнителей и функциональных модификаторов.

Материалы и методы

В качестве вторичных термопластичных матриц (весовое соотношение 1:1) применяли:

1) полиэтилен высокого давления (ПЭВД), полученный в ИММС НАН Беларуси из регранулированных отходов пневмоэкструзионного формирования волокнистых изделий;

2) полипропилен (ПП), полученный в КУП «Спецкоммунтранс» из регранулированных

дробленых отходов тары.

Переработку смесей полимеров в композиционный регранулят проводили с помощью 2-шнекового экструдера SuPlast. При экструзии использовали технологические добавки — стеарат цинка (Ст.Zn, твердая смазка), сополимер этилена и винилацетата (СЭВА, эластомерный регулятор реологии расплавов); неорганические наполнители — монтмориллонит (ММТ), тальк, мел (структурирующие добавки); функциональные модификаторы — VS (компатибилизатор полиолефинов), ПО АО11 (термостабилизатор), 027 ПП (нуклеатор-структурообразователь), МУВ (модификатор ударной вязкости).

Полученные из регранулята с помощью литьевой машины образцы исследовали на разрывной машине с установлением показателей предела текучести, максимального удлинения при растяжении и напряжения при разрыве.

Результаты и их обсуждение

Существенный недостаток отходов пластмасс – естественное ухудшение комплекса физико-механических свойств. Компенсирование этого обстоятельства возможно на пути создания новых оригинальных рецептурных решений в области полимерного материаловедения [1]. Есть сведения, что это позволит сэкономить до 40 мас.% первичных полимеров за счет их замены вторичным полимерным сырьем. Перспективным направлением для улучшения свойств вторичных полимеров и их смесей представляется их целевое модифицирование путем физического и механо-химического воздействия на полимерную матрицу. Известно, что модифицирование способно обеспечить взаимную термодинамическую совместимость полиолефиновых отходов и формирование однородной структуры материала с воспроизводимыми свойствами [2]. Существует ряд функциональных добавок, которые способны влиять на совместимость полимерных матриц: это является необходимым условием формирования стабильной структуры и предсказуемой комбинации эксплуатационных свойств. Высказывается мнение о том, что модифицирование полимерного сырья подразумевает введение в полимер активных наполнителей, способствующих, с одной стороны, протеканию в полимерной матрице химической сшивки, а с другой стороны, проявлению в композиционной системе упрочняющего эффекта. Эффект модифицирования достигается в результате конкурирующих процессов сшивки и деструкции [3].

Результаты экспериментов, проведенных со смесями вторичных полимеров, представлены в таблице 1.

Таблица 1. **Усредненные показатели свойств смесей вторичных полимеров**

Составы	Предел текучести, МПа	Максимальное удлинение, %	Напряжение при разрыве, МПа
ПЭВД + ПП	12,7	~50	9,8
ПЭВД + ПП + 5% СЭВА + 0,5% Ст.Zn	14,5	~146	11,6
ПЭВД + ПП + 10% СЭВА + 0,5% Ст.Zn	13,5	~196	12,7
ПЭВД + ПП + 1% ПО АО11 + 0,5% Ст.Zn	15,4	~53	11,9
ПЭВД + ПП + 2,5% ПО АО11 + 0,5% Ст.Zn	15,5	~73	12,9
ПЭВД + ПП + 1% 027-ПП + 0,5% Ст.Zn	15,5	~100	11,8
ПЭВД + ПП + 2,5% 027-ПП + 0,5% Ст.Zn	15,5	~125	11,8
ПЭВД + ПП + 2,5% МУВ + 0,5% Ст.Zn	12,3	~158	12,1
ПЭВД + ПП + 5% МУВ + 0,5% Ст.Zn	14,8	~424	14,4
ПЭВД + ПП + 1% ММТ+2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	14,3	~228	11,8
ПЭВД + ПП + 3% ММТ + 2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	14,3	~183	11,8
ПЭВД + ПП + 5% ММТ + 2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	13,5	~180	12,7
ПЭВД + ПП + 5% тальк + 2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	14,4	~60	8,9

ПЭВД + ПП+5% мел + 2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	14,4	~63	10,7
ПЭВД + ПП + 10% тальк + 2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	16,1	~31	12,3
ПЭВД + ПП + 10% тальк + 2,5% МУВ + 0,5% Ст.Zn	15,6	~18	15,3
ПЭВД + ПП + 10% мел + 2,5% МУВ + 0,5% Ст.Zn	14,8	~16	14,2
ПЭВД + ПП + 10% мел + 2,5% VS + 0,5% Ст.Zn	14,8	~27	12,0

Основные тенденции изменений, которые удаётся зафиксировать:

1) применение добавок позволило улучшить показатели физико-механических свойств смесей полиолефинов, в то время как термостабилизатор не дал такого эффекта;

2) применение добавок технологического характера (СЭВА, Ст.Zn) существенно сказалось на величине максимального удлинения при растяжении, повысив ее в 3–4 раза;

3) эффект в виде роста всех трёх показателей дало введение активных функциональных модификаторов 027-ПП и МУВ, причем последний агент должен вводиться при концентрациях не менее 5 мас.%, что даёт наилучший результат;

4) введение неорганических наполнителей, невзирая на присутствие активных агентов VS и МУВ, оказало в целом негативное воздействие на величину удлинения, но позволило улучшить предел текучести и напряжение при разрыве.

Заключение

Представляется, что целевой рециклинг должен быть ориентирован на поиск комбинации модификаторов, которые могут дать синергический эффект в виде нивелирования ухудшения свойств вторичных полимеров за счет действия на разных масштабных уровнях и по нескольким физико-химическим механизмам (фактически гибридным способом).

Работа выполнена в рамках подпрограммы 4 «Развитие научно-производственной деятельности НАН Беларуси» Государственной программы «Наука для экономики и общества» на 2026–2030 годы.

1. Шайерс Дж. Рециклинг пластмасс. Наука, технологии, практика: пер. с англ. — СПб.: Научные основы и технологии. — 2012.
2. Абдуллаев Р. А., Журабоев Ф. М., Джураев М. А. Модификация полимеров // Академическая публицистика. — 2018, № 6, 16—20.
3. Зинович З. К., Халецкий В. А. Рециклинг полимеров: информационные, экологические и технологические аспекты. — Минск: Изд-во С. Лаврова. — 1999.

ВЛИЯНИЕ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.К. Меринов

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

Введение

На металлургических предприятиях ежегодно образуется значительное количество различного рода отходов, к числу наименее утилизируемых относится пыль газоочистных установок (ПГУ), представляющая собой смесь оксидов металлов [1]. Негативными последствиями накопления подобного рода отходов являются экономические затраты и загрязнение окружающей среды [2]. В связи с этим вопрос повторного использования отходов сталеплавильного производства является актуальной экономической и экологической задачей.

Цель работы – исследование влияния пыли газоочисток на физико-механические характеристики композиционных материалов на основе различных полимерных матриц.

Материалы и методы исследования

В качестве термостойких матриц полимерных фрикционных композиционных материалов (ПКФМ) использовали ПТФЭ (фторопласт-4) (ГОСТ 10007-80), сополимер тетрафторэтилена и этилена (фторопласт-40) (ТУ 301-05-17-89), и полимерную композицию Ф4К20 (ТУ 6-05-1412–76). В качестве волокнистых наполнителей использовали базальтовые волокна (СТБ 1908-2008). В качестве металлосодержащей добавки при изготовлении фрикционного материала использовали пыль газоочистных установок электроплавильных печей, представляющую собой смесь дисперсных частиц оксидов металлов.

Ползучесть под статической нагрузкой материала определяли путем выдержки цилиндрического образца диаметром 0,015 м и высотой 0,020 м под нагрузкой 20,0 МПа в течение 24 часов. За количественную меру ползучести принимали абсолютную деформацию образца в направлении действия статической нагрузки. Для определения ударной вязкости по Шарпи использовали стандартные методы испытаний.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований ползучести под статической нагрузкой в зависимости от типа используемой фторполимерной матрицы и содержания ПГУ представлены на рисунке 1.

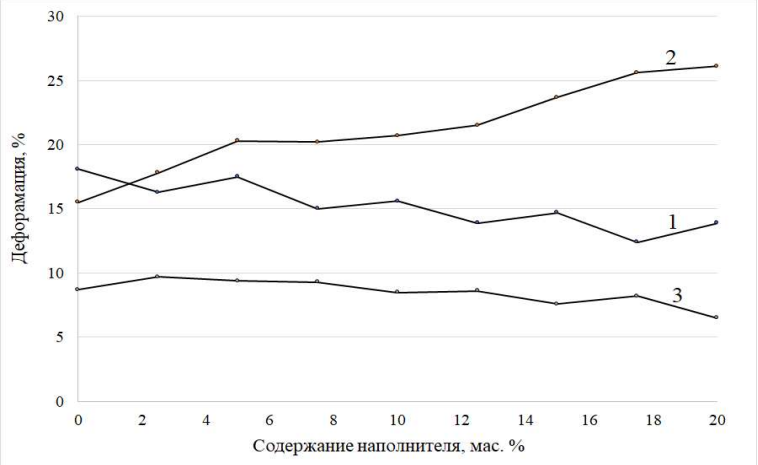


Рис. 1. **Зависимость ползучести ПКФМ от типа матрицы и содержания ПГУ: 1 – ПКФМ на основе Ф4; 2 – ПКФМ на основе Ф4К20; 3 – ПКФМ на основе Ф40**

Показано, что повышение содержания наполнителя приводит к снижению деформации образцов ПКФМ на основе матриц Ф4 и Ф40, изменение деформации образцов ПКФМ на основе матрицы Ф4 при этом носит колебательный характер. Деформация образцов ПКФМ на основе матрицы Ф4К20 увеличивается с 17,8 % при 2,5 мас. % содержания ПГУ до 26,1 % при 20 мас. % содержания ПГУ.

Результаты исследований ударной вязкости ПКФМ в зависимости от типа используемой фторполимерной матрицы и содержания ПГУ представлены на рисунке 2.

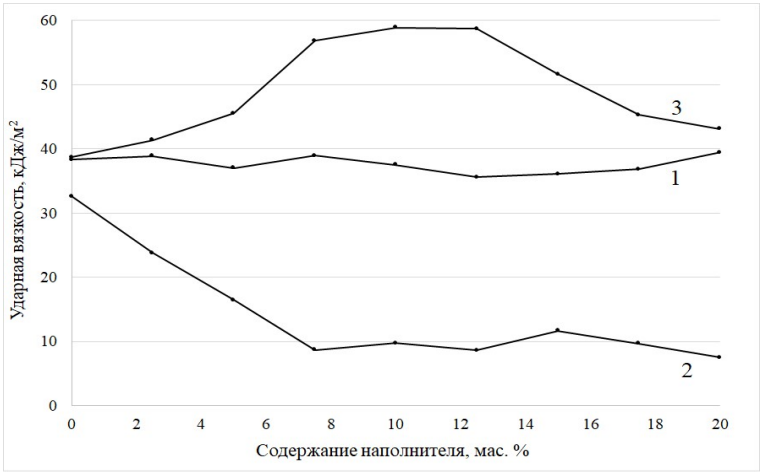


Рис. 2. **Зависимость ударной вязкости ПКФМ от типа матрицы и содержания ПГУ: 1 – ПКФМ на основе Ф4; 2 – ПКФМ на основе Ф4К20; 3 – ПКФМ на основе Ф40**

Установлено, что с повышением содержания наполнителя ударная вязкость ПКФМ на основе Ф4 практически не изменяется. Ударная вязкость ПКФМ на основе Ф4К20 снижается с 23,8 кДж/м^2 при 2,5 мас. % содержания ПГУ до 8,7 кДж/м^2 при 7,5 мас. % содержания ПГУ. Ударная вязкость ПКФМ на основе Ф40 повышается с 41,4 кДж/м^2 при 2,5 мас. % содержания ПГУ до 58,7 кДж/м^2 при 12,5 мас. % содержания ПГУ, дальнейшее увеличение содержания наполнителя приводит к снижению ударной вязкости композитов.

Заключение

Установлено, что минимальной ползучестью обладают ПКФМ на основе фторопласта Ф40. Для ПКФМ на основе матриц Ф4 и Ф40 деформация с ростом степени наполнения снижается, а для ПКФМ на основе Ф4К20 – увеличивается. Показано, что ударная вязкость ПКФМ на основе матрицы Ф4 практически не изменяется во всем исследованном диапазоне наполнения. Ударная вязкость ПКФМ на основе композиции Ф4К20 снижается с увеличением содержания наполнителя в диапазоне от 2,5 до 7,5 мас. % содержания ПГУ. Ударная вязкость ПКФМ на основе фторопласта марки Ф40 повышается в диапазоне наполнения от 2,5 до 12,5 мас.% содержания ПГУ.

1. Пыль и шлам газоочисток металлургических заводов и анализ путей их утилизации / Летимин В. Н, Макарова И.В., Васильева М.С., Насыров Т.М. // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – №. 1 (16). – С. 82-86.
2. Сунгатуллина, Е. Р. Влияние отходов черной металлургии на окружающую среду / Сунгатуллина Е. Р., Сидельникова О. П. // Инженерный вестник Дона. – 2026. – №. 1 (131). – С. 31.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОИНИЦИИРУЕМОЙ КАТИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ВИНИЛОВЫХ ЭФИРОВ НА ПРИМЕРЕ ИЗОБУТИЛОВОГО ЭФИРА

П.А. Никишев, А.Д. Шарайчук, М.С. Хорецкий, Л.В. Гапоник

Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь,
pavel.nikishau@gmail.com

Виниловые эфиры вследствие электронодонорного влияния алкоксильного заместителя характеризуются высокой активностью в катионной полимеризации. Современные подходы к контролируемому синтезу полимеров основаны на обратимом переводе активных

оксокарбениевых центров в «спящие» формы, что позволяет регулировать молекулярно-массовые характеристики и концевую функциональность полимеров [1]. Электрохимическая активация агентов передачи цепи обеспечивает дозированное генерирование активных центров и временной контроль роста макромолекул [2].

Целью работы являлось выявление закономерностей электрохимически инициируемой катионной полимеризации изобутилвинилового эфира (ИБВЭ) и оценка возможности управления ростом цепей. Сопоставлены прямое электроинициирование и медиаторные системы DDQ/CTA1 и TEMPO/CTA1, где CTA1 – S-(1-изобутоксиэтил)-N,N-диэтилдитиокарбамат. Конверсию определяли гравиметрически; строение и молекулярно-массовые характеристики продуктов исследовали методами ^{1}H ЯМР-спектроскопии и ГПХ.

Установлено, что способ переноса электрона от электрода оказывает существенное влияние на ход полимеризации. Прямое электроинициирование обеспечивает интенсивное превращение мономера, но не позволяет эффективно контролировать молекулярно-массовое распределение. Введение редокс-медиаторов способствует генерированию активных центров в объёме раствора и снижает вклад неконтролируемых процессов на поверхности электрода.

Наиболее благоприятное сочетание активности и контроля роста цепей достигнуто в системе TEMPO/CTA1. Для оценки способности концевых групп к повторной активации после завершения первого этапа полимеризации в ту же реакционную смесь вводили дополнительную порцию ИБВЭ. Последующее превращение добавленного мономера в полимер и смещение максимума пика на ГПХ-кривой поли(ИБВЭ) в область больших молекулярных масс указывают на продолжение роста по крайней мере большей части ранее сформированных макромолекул. Полученные результаты обосновывают перспективность медиаторного подхода для направленного электрохимического управления катионной полимеризацией виниловых эфиров.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Химические процессы и технологии», 2026-2030 гг. (задание 2.1.01.01, № гос. регистрации 20261334).

1. 1 Singha S. et al. ACS Polym. Au 4, 189-207 (2024).
2. 2 Peterson B.M., Lin S., Fors B.P. J. Am. Chem. Soc. 140, 2076-2079 (2018).

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ КОЖЕВЕННЫХ И ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

В.А. Останин[1], И.А. Латышевич[1,2], Е.С. Данильчик[1], Н.А. Герман[1]

[1]Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

[2]Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; irinalatyshevitch@gmail.com

Введение

Отходы деревообрабатывающих и кожевенных производств являются ценными сырьевыми ресурсами, который могут использоваться вторично для производства материалов различного назначения. Так, например, в быту, промышленности и сельском хозяйстве используется огромный спектр продукции из отходов деревообработки: ориентированно-стружечная плита, древесноволокнистая плита средней плотности, древесностружечные и древесноволокнистые плиты, древесно-пластиковые композиты, целлюлоза, биотопливо и др., качество которых не уступает материалам из высококачественной древесины. Поиск путей утилизации отходов деревообрабатывающих и кожевенных производств является перспективным направлением, как для развития современной промышленности, так и для улучшения экологической ситуации за счет

сохранения лесных массивов и уменьшения негативного влияния на экосистему. Одним из возможных вариантов утилизации является применение их для производства композитных материалов, которые могут найти применение в строительстве, автомобилестроении и мебельной промышленности. Это позволит не только решить экологическую проблему, но и получить новую продукцию с добавленной стоимостью.

Материалы и методы

В качестве исходного сырья для изготовления композитных материалов использованы отходы деревообрабатывающего (древесные опилки и пыль древесноволокнистой плиты средней плотности) и кожевенного (обрезная кожа после дубления) производств. Композиты получены без использования связующего с целью изучения аутогезии и оценки истинной адгезионной прочности материалов. Для определения показателей плотности и зольности [1] в лабораторных условиях применены методы, описанные в действующих стандартах.

Основная часть

Целью данных научных исследований является разработка композитного материала на основе отходов кожевенной и деревообрабатывающей промышленности без использования связующего и установление влияния качественного и количественного состава на плотность и зольность, которая характеризует формоустойчивость, и служит оценкой содержания хрома. Оптимальное количество может играть роль мелкодисперсного наполнителя. Избыточная зольность приводит к хрупкости материала. На рис. 1 представлены образцы композитного материала, где состав соответствует соотношениям исходного сырья по плану Шеффе [2].



Рис. 1 **Образцы композитных материалов с различным качественным и количественным составом древесных и кожевенных отходов**

Композитные материалы получены путем варьирования качественного (древесные опилки: пыль древесноволокнистых плит средней плотности: обрезная кожа после дубления) и количественного составов без использования связующего с применение лабораторного гидравлического обогреваемого пресса (температура – 180±2 ºС, продолжительность – 7 мин, давление плит пресса – 50 кН).

Для полученных композитных материалов, с использованием стандартизированных методов, определены плотность и зольность.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных данных позволил разработать композитный материал без использования связующего, определить соотношение компонентов и установить влияние качественного и количественного состава на плотность и зольность образцов. Зависимость плотности и зольности композитного материала от содержания отходов кожевенного производства приведены на рис. 2 и 3.

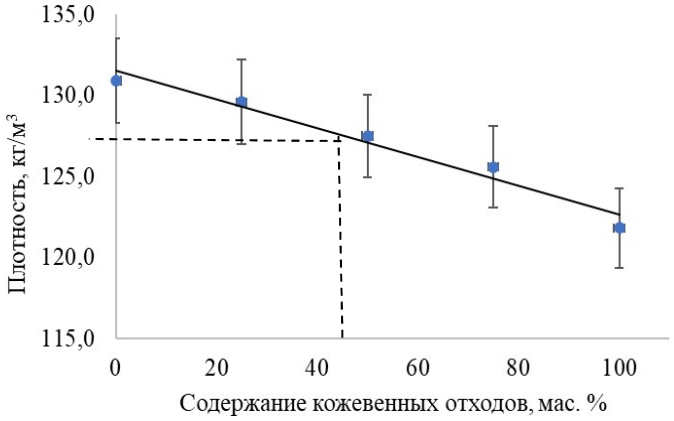


Рис.2 **Зависимость плотности композитных материалов от содержания отходов кожевенной промышленности**

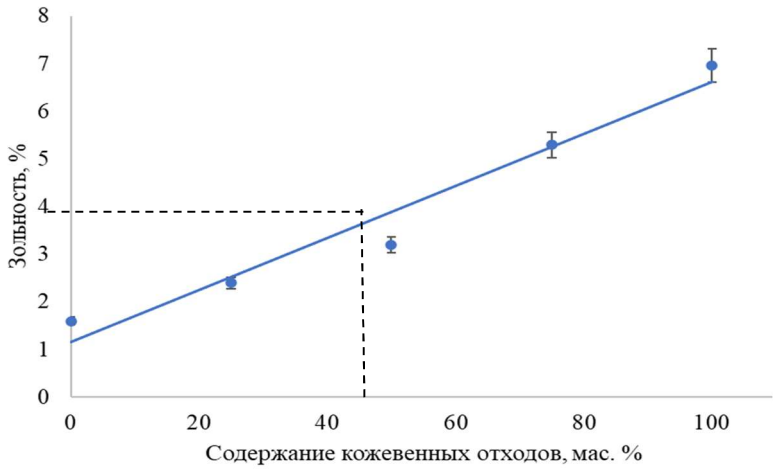


Рис.3 **Зависимость зольности композитных материалов от содержания отходов кожевенной промышленности**

Установлено, что увеличение содержания отходов кожевенного производства приводит к снижению плотности композитного материала (с 131 до 122 кг/м^3) и росту зольности (с 1,5 до 7,0 %). Рекомендуемое содержание отходов кожевенного производства до 50 %.

1. ГОСТ 10634-88. Плиты древесностружечные. Метод определения физических свойств. 01.01.1990.
2. Пен Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства / Р.З. Пен. – Красноярск : Красноярский гос. ун-т., 1982. – 192 с.

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕНОС И ШТАРКОВСКИЙ ОТКЛИК КАТИОННЫХ CdSe/ZnS КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ЦИСТЕАМИНОМ

Н.А. Павлова, С.В. Шевчик, А.А. Кустанович, И.Г. Мотевич, Н.Д. Стрекаль

Гродненский государственны университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; pavlova_na_19@mail.ru

Введение

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) – это нанокристаллы, чьи электронные и оптические свойства определяются квантово-размерным эффектом. Благодаря высокой яркости, фотостабильности, широким полосам поглощения и узким, настраиваемым по размеру

спектрам эмиссии они активно применяются в качестве люминесцентных зондов для детекции металлов, белков, биомаркеров, пестицидов и других аналитов [1]. Флуоресцентные КТ-сенсоры обеспечивают пределы обнаружения в среднем на уровне десятков наномоль, что делает их конкурентоспособными для диагностических задач [1]. Однако стандартные коллоидные методы синтеза дают гидрофобные КТ, покрытые триоктилфосфином (ТОФ) или другими длинноцепочечными лигандами, что препятствует их прямому применению в водных биологических средах. Для перехода в водную фазу требуется заменить исходные лиганды на гидрофильные молекулы, способные не только обеспечивать коллоидную стабильность, но и сохранять высокий квантовый выход люминесценции.

Цель

Оптимизация солюбилизации CdSe/ZnS КТ с использованием цистеамина в двухфазной системе хлороформ - вода; исследование влияния полноты лигандного обмена на оптические характеристики полученных водорастворимых частиц, оценка их стабильности и чувствительности к pH.

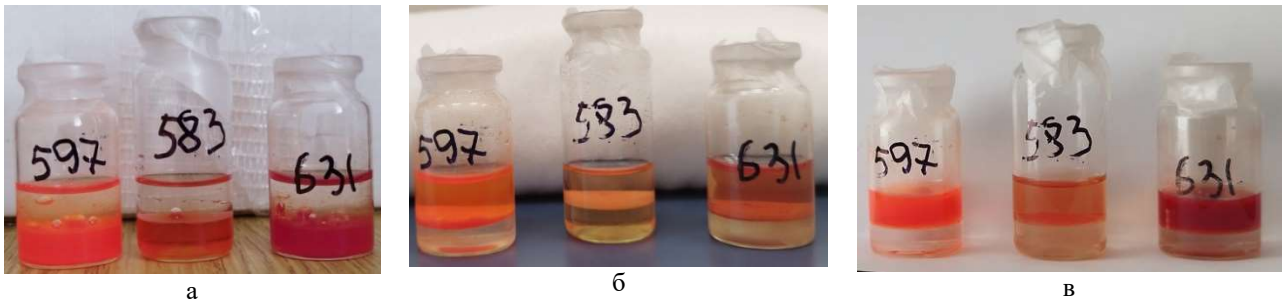
Материалы и методы

Объектом исследования являются CdSe/ZnS КТ с исходной гидрофобной поверхностью, стабилизированные цистеамином [2]. Предмет исследования - процесс лигандного обмена в двухфазной системе хлороформ - вода, его стадийность, полнота и влияние на спектральные характеристики, заряд поверхности и стабильность в диапазоне pH. Использованы КТ CdSe/ZnS трёх размеров (максимумы флуоресценции 583 нм, 597 нм и 631 нм), синтезированные высокотемпературным коллоидным методом. Солюбилизацию проводили на границе раздела фаз: нижняя - хлороформ с КТ, верхняя - водный раствор цистеамина. Процесс контролировали визуально и спектрально, фиксируя изменение окраски слоёв. Для характеристики применяли конфокальный микроскоп Nanofinder S (возбуждение 473 нм) для регистрации спектров люминесценции.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов установлено, что солюбилизация протекает за счет замещения остатков ТОФ и сорбции цистеамина из водного раствора на поверхности КТ и зависит от содержания пассиватора в водной фазе.

На рис. 1 представлены три последовательные стадии процесса.



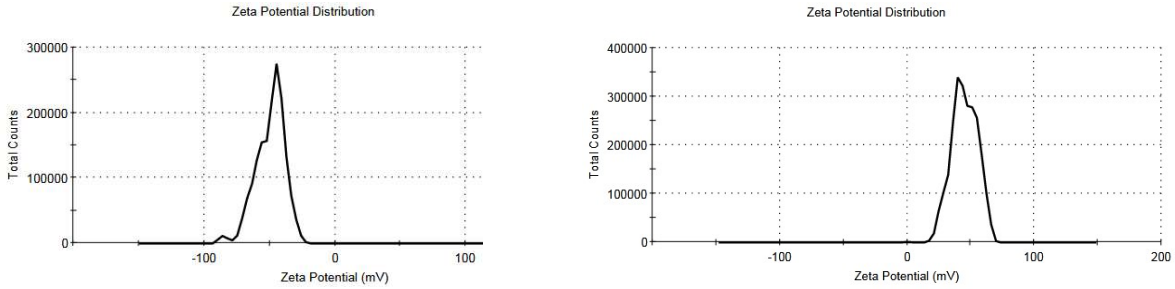
а б в

Рис. 1. **Солюбилизация CdSe/ZnS КТ на поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей в начальный (а) момент времени, через сутки (б) и на окончательной стадии процесса (в)**

В начальный момент (рис. 1, а) КТ скапливаются на границе раздела, формируя области «вспучивания», что свидетельствует о частичном замещении молекул ТОФ на цистеамин и появлении амфифильных свойств. Через сутки (рис. 1, б) лишь часть КТ самопроизвольно переходит в верхнюю водную фазу, тогда как значительная доля остаётся на границе раздела из-за недостатка пассиватора в водном слое. Эти частицы сохраняют амфифильность и не образуют устойчивого коллоидного раствора. Ключевым решением оказалась замена верхней

водной фазы на свежий раствор цистеамина - это обеспечивает практически количественный переход всех КТ в водный слой (рис. 1, в), при этом нижняя хлороформная фракция становится почти бесцветной. Таким образом, доказана критическая важность избытка лиганда для полного покрытия поверхности нанокристаллов и достижения коллоидной стабильности.

В спектрах люминесценции солюбилизированных КТ наблюдается коротковолновый сдвиг максимума до 22 нм относительно исходных в хлороформе. Согласно модели, описанной Бавенди в работе [3], этот сдвиг интерпретируется как само-индуцированный эффект Штарка, возникающий, когда рекомбинация экситона происходит в поле электрона, захваченного в приповерхностную ловушку. Расчёт напряжённости этого поля по модели, представленной в работе [4] показывает, что локализованный заряд находится на расстоянии, сопоставимом с радиусом КТ, что свидетельствует о наличии долгоживущего отрицательного заряда в дефектах кристаллической структуры. Такие КТ принято называть штарковскими. Наличие долгоживущего отрицательного заряда подтверждается измерениями (рис. 2) дзета-потенциала.



а б

Рис. 2. **Распределение дзета-потенциала квантовых точек CdSe/ZnS, покрытых цистеамином, в водном растворе при pH 10 (a) и 5 (b)**

Из рис. 2 видно: в слабокислой среде (pH 5) $\zeta = +45$ мВ (средний поверхностный заряд +1 e), что обеспечивает высокую стабильность. В щелочной среде (pH 10) наблюдается перезарядка поверхности - распределение становится бимодальным с появлением стабильной фракции ($\zeta = -49$ мВ, заряд -1,5 e) и нестабильной, удаляемой центрифугированием. Это коррелирует с депротонированием аминогрупп цистеамина (pKa 10,75) и изменением типа эффекта Штарка от линейного (дипольный отклик, pH <7) к квадратичному (поляризуемость, pH >7). Кроме того, установлено, что интенсивность люминесценции и среднее время затухания изменяются синбатно с pH, имея сигмообразный характер с точкой перегиба около 7,0, что объясняется балансом протонов и гидроксил-ионов, влияющих на интеграл перекрывания волновых функций электрона и дырки.

Выводы

Аппробирован эффективный протокол солюбилизации CdSe/ZnS КТ цистеамином, основанный на замене водной фазы для достижения полного лигандного обмена. Полученные катионные КТ демонстрируют высокую коллоидную стабильность в кислых средах и чувствительность к pH, что выражается в штарковском смещении спектров и перезарядке поверхности. Эти свойства открывают перспективу использования таких КТ в качестве pH- чувствительных нанозондов для оценки ацидоза в микроокружении опухолевых клеток, что может служить дополнительным прогностическим критерием в онкодиагностике.

Благодарности. Работа выполнена по договору с БРФФИ № Ф26РНФ-173 от 27.01.2026 г.

1. Loskutova A., Seitkali A., Aliyev D., Bukasov R. Quantum Dot-Based Luminescent Sensors: Review from Analytical Perspective // International Journal of Molecular Sciences. 2025. Vol. 26, No. 14. P. 6674.

2. Патент BY 17735, МПК C 09K 11/88 (2006.01); B 82B 3/00 (2006.01); B 82Y 15/00 (2006.01) Способ модификации поверхности наночастиц CdSe/ZnS : № a 20110574 : заявл. 04.05.2011 : опубл. 30.12.2013 / Н. Д. Стрекаль, С. А. Маскевич ; заявитель Учреждение образования "Гродненский государственный университет имени Янки Купалы". – 4 с. : ил.
3. Empedocles, S.A. Quantum–confined stark effect in single CdSe nanocrystallite quantum dots / S.A.Empedocles, M.G. Bawendi // Science. – 1997. – Vol. 278. – P. 2114–2117.
4. Sergey I. Pokutnyi, Oksana V. Naumenko. Size Quantization Stark Effect in Quantum Dots. Optics. Special Issue: Optics and Spectroscopy of the Charge Carriers and Excitons States in Quasi - Zero - Dimensional Nanostructures. Vol. 3, No. 6-1, 2014, pp. 57-60. doi: 10.11648/j.optics.s.2014030601.19

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ПОЛИЭТИЛЕНИМИНА РАЗЛИЧНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ В ОСАДИТЕЛЬНУЮ ВАННУ НА СВОЙСТВА УЛЬТРА- И НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФОНА

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

Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь; e.polivenok@mail.ru

Введение

Полифениленсульфон (ПФС) характеризуется рядом уникальных свойств, таких как высокие механическая прочность, химическая и термическая стойкость, что обуславливает интерес к нему и открывает перспективы для использования в качестве материала для изготовления ультра- и нанофильтрационных мембран. Однако, у ПФС есть и существенный недостаток – высокая гидрофобность, что негативно сказывается на транспортных и эксплуатационных характеристиках мембран на его основе. В связи с этим существует необходимость в разработке новых методов модификации мембран на основе ПФС. Одним из способов модификации является введение полиэлектролитов в осадительную ванну (ОВ) в процессе их изготовления методом инверсии фаз способом мокрого формования. Это приводит к иммобилизации макромолекул полиэлектролитов в поверхностном селективном слое мембран и позволяет направленно регулировать их свойства. Кроме того, модификация полиэлектролитами оказывает влияние на последующий процесс формирования полиамидного (ПА) селективного слоя на поверхности пористой мембраны-подложки при получении композиционных мембран (КМ) для нанофильтрации методом межфазной поликонденсации (МП) и, как следствие, на их структуру, что открывает возможности улучшения транспортных свойств мембран – проницаемости и селективности.

Цель работы заключалась в установлении влияния модификации с использованием в качестве ОВ водных растворов полиэтиленимина различной молекулярной массы на гидрофильно-гидрофобный баланс поверхности и транспортные свойства полифениленсульфоновых ультрафильтрационных мембран-подложек и полученных на их основе методом МП композиционных мембран для нанофильтрации.

Материалы и методы

При получении композиционных мембран для нанофильтрации (НФ) в качестве пористой мембраны-подложки применяли плоские ультрафильтрационные (УФ) мембраны. Данные УФ-мембраны получали методом инверсии фаз способом мокрого формования из полимерного раствора, содержащего 18% ПФС, 15% полиэтиленгликоля ($<M_n>$ = 20000 г·моль$^{-1}$, ПЭГ) в качестве порообразователя и 67% N-метил-2-пирролидона (NMP) в качестве растворителя. Модификацию мембран-подложек осуществляли в процессе их формования при использовании в качестве ОВ водных растворов разветвлённого полиэтиленимина ($<M_W>$ = 25000 г·моль$^{-1}$ и $<M_W>$ = 60000 г·моль$^{-1}$, ПЭИ) с концентрацией 0,15, 0,3, 0,5 масс.%. КМ для нанофильтрации изготавливали путём нанесения тонкого селективного ПА-слоя методом МП на УФ мембраны-

подложки. В качестве реагентов в процессе МП использовали предварительно приготовленные водные растворы пиперазина (ПИП) с концентрациями 2 и 4%, а также 0,12 и 0,24% растворы тримезоилхлорида (ТМС) в нефрасе С2 соответственно.

Результаты и их обсуждение

Проведено исследование гидрофильно-гидрофобного баланса поверхности и транспортных свойств (удельной производительности и селективности) УФ мембран-подложек и полученных на их основе методом МП композиционных мембран для нанофильтрации в зависимости от молекулярной массы и концентрации ПЭИ в осадительной ванне.

Было выявлено, что при введении добавки ПЭИ различной молекулярной массы в ОВ при получении УФ-мембран методом инверсии фаз происходит гидрофилизация поверхности их селективного слоя (рис. 1а). Так, установлено, что уже при концентрации 0,15 масс. % в ОВ и ПЭИ 25000, и ПЭИ 60000 наблюдается снижение значения краевого угла смачивания мембран по воде до 48° и 45°соответственно, по сравнению с 55º для исходной мембраны. При дальнейшем повышении концентрации ПЭИ 25000 и ПЭИ 60000 в ОВ до 0,5 масс. % значения краевого угла смачивания снижаются до 39º и 40º соответственно. В ходе исследования транспортных свойств УФ-мембран наблюдалось, что увеличение концентрации ПЭИ в ОВ приводит к росту их удельной производительности по воде (рис. 1б), при этом коэффициенты задерживания поливинилпирролидона (ПВП К-30) преимущественно сохранялись на достаточно высоком уровне в диапазоне 87-91%.

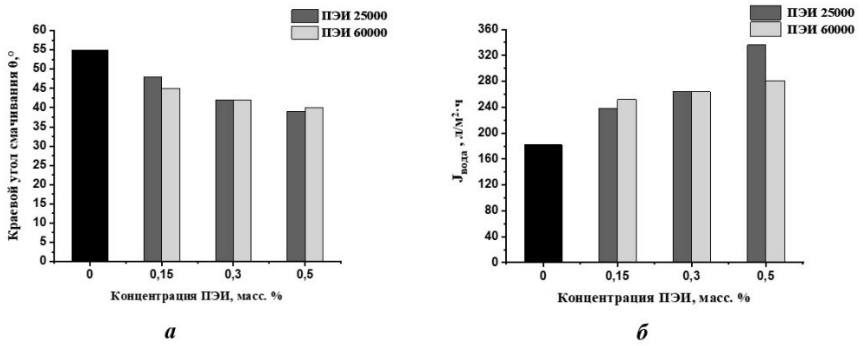


Рис. 1**. Краевой угол смачивания по воде (а) и удельная производительность по воде ($J_{вода}$) (б) УФ-мембран на основе ПФС в зависимости от концентрации ПЭИ различной молекулярной массы в ОВ (условия процесса ультрафильтрации: ΔP = 0,1 МПа, перемешивание, T = 20 °C)**

Показано, что использование УФ-мембран, модифицированных введением ПЭИ в ОВ, в качестве пористых мембран-подложек при получении КМ для нанофильтрации методом МП приводит к гидрофилизации поверхности селективного ПА-слоя последних. Транспортные свойства КМ изучали в процессе нанофильтрации дистиллированной воды и модельных растворов солей, смесей солей лития и магния, антибиотика (сульфадиметоксина), витамина B_{12} (ΔP = 0,5 МПа). В результате было установлено, что увеличение концентрации ПЭИ 25000 в ОВ приводит к увеличению удельной производительности НФ-мембран по воде. Например, для серии мембран с селективным слоем 2% ПИП, 0,12% ТМС при увеличении концентрации ПЭИ 25000 в ОВ с 0,15 до 0,3 масс. % наблюдалось повышение удельной производительности по воде с 29,7 до 69,3 $л \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$. В свою очередь, увеличение молекулярной массы ПЭИ с 25000 $г \cdot моль^{-1}$ до 60000 $г \cdot моль^{-1}$ при постоянной концентрации приводит к повышению коэффициентов задерживания солей, сульфадиметоксина и витамина B_{12}.

На основе УФ мембраны-подложки, модифицированной с использованием в качестве ОВ водного раствора с 0,3 масс. % ПЭИ 25000, методом МП при концентрациях мономеров 4% ПИП и 0,24% ТМС была получена КМ для нанофильтрации, которая продемонстрировала высокие значения коэффициентов задерживания солей: $MgSO_4$ – 97%, Na_2SO_4 – 96%, $MgCl_2$ и

$CaCl_2$ – 89%, NaCl – 27%, LiCl – 26%, а также сульфадиметоксина – 92% и витамина B_{12} – 91%. Кроме того, данная мембрана характеризовалась самыми высокими значениями фактора разделения солей магния и лития среди всех разработанных КМ: фактор разделения для раствора с соотношением Mg^{2+}/Li^{+} – 5 составил 18, для соотношения 20 – 21, для 50 – 32, для 100 – 50.

Таким образом, показано, что модификация УФ мембран-подложек на основе ПФС путём введения ПЭИ различной молекулярной массы в ОВ является эффективным способом регулирования гидрофильно-гидрофобного баланса поверхности и транспортных свойств как самих УФ мембран-подложек, так и получаемых на их основе методом МП композиционных мембран для нанофильтрации.

ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМПАУНД-W

А.А. Роткович, Я.О. Чернышева, А.А. Зубеня, С.А. Герман, А.Н. Котельникова, А.В. Труханов, А.С. Дашкевич, Д.И. Тишкевич

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь; rottkovich@gmail.com

Цель

Исследование и характеристика микроструктуры и физико-химических параметров композиционных материалов системы компаунд-W.

Введение

Вопрос повышения радиационной стойкости полимерных материалов остается актуальным для многих областей техники. Одним из перспективных решений является использование компаундов, модифицированных наполнителями с высоким атомным номером. Эффективность таких композиций определяется двумя взаимосвязанными характеристиками. От плотности материала зависит вероятность ослабления потока гамма-квантов. Чем выше плотность компаунда, тем интенсивнее протекают процессы рассеяния и поглощения ионизирующего излучения. Увеличение массовой доли тяжелого компонента само по себе не решает задачу достижения высокой плотности. Существенное значение имеют природа полимерной основы и технологические приёмы смешения, позволяющие предотвратить образование агломератов и обеспечить равномерное структурирование материала [1]. Дополнительным инструментом контроля служит элементный анализ, который дает возможность подтвердить фактическое наличие вольфрама в компаунде, проверить корректность его дозировки и одновременно охарактеризовать однородность распределения частиц по объему [2].

Материалы и методы

Для приготовления образцов применяли порошок вольфрама (99,99 %) и связующее Hysol EO7021 с варьированием содержания W от 40 до 80 мас.%. Смешение компонентов проводили на магнитной мешалке в течение 15 минут с последующей дегазацией на водяной бане и отверждением при 150 °C в течение 30 минут. Элементный состав и характер распределения наполнителя оценивали методом энергодисперсионной спектроскопии. Плотность образцов определяли гидростатическим взвешиванием по методу Архимеда.

Результаты и их обсуждение

В таблице приведены экспериментальные значения плотности для каждого исследованного состава герметика. Относительная плотность, представленная в процентах, отражает степень расхождения между практическими данными и расчётными значениями. Данный параметр

показывает, насколько измеренная плотность герметика соответствует теоретически ожидаемой величине.

Таблица 1. **Значения плотностей для системы компаунд-W**

Содержание W, мас.%	Содержание компаунда, мас.%	Плотность, г/см³	Относительная плотность, %	Пористость, %
40	60	1,95	92,5	7,5
60	40	2,70	93,6	6,2
80	20	4,51	94,1	5,7

В ходе измерений зафиксирован монотонный рост плотности образцов по мере увеличения содержания W от 1,95 до 4,51 г/см³. Значения относительной плотности лежат в диапазоне от 92,5 до 94,1 %, что указывает на высокую степень совпадения с расчетными величинами и минимальную дефектность структуры. Пористость не превышает 7,5 %, что подтверждает правильность выбранных технологических режимов.

Согласно данным энергодисперсионной спектроскопии, распределение вольфрама в компаунде имеет различный характер (рис.).

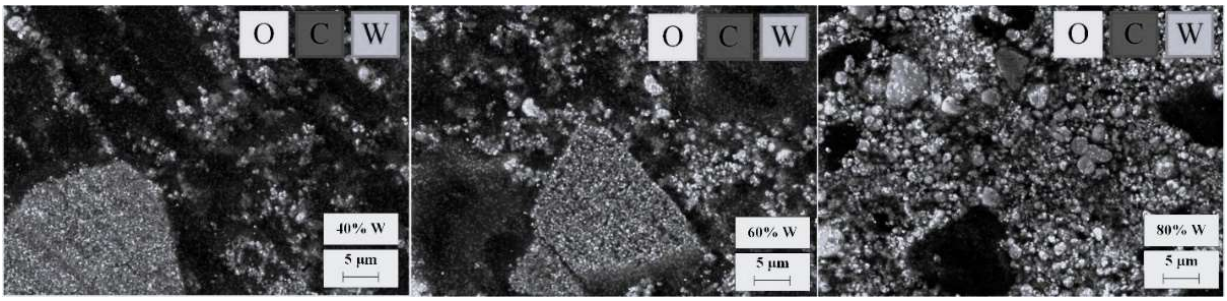


Рис. 1. **Карты химического состава композиционных материалов системы компаунд-W**

Анализ микроструктуры выявил, что в образцах присутствуют отдельные участки, где частицы вольфрама образуют скопления, причем их число и размеры увеличиваются пропорционально массовой доле наполнителя. Однако, если не принимать во внимание эти локальные неоднородности, в целом можно говорить о достаточно равномерном заполнении полимерной фазы частицами W. Максимальная плотность упаковки включений зафиксирована для образца с содержанием W 80%. Данные, полученные при картировании элементного состава, однозначно свидетельствуют о том, что во всех изученных составах присутствуют как вольфрам, так и углерод с кислородом (полимерная часть).

Выводы

Экспериментальные данные подтверждают, что повышение массовой доли W закономерно приводит к увеличению плотности, при этом максимальное зафиксированное значение составляет 4,51 г/см³. Относительная плотность во всех исследованных составах стабильно превышает 92,5 %, а уровень пористости не поднимается выше 7,5 %, что свидетельствует о высокой степени совершенства структуры и низкой концентрации дефектов в полученных материалах. Характер распределения включений показывает, что, несмотря на фиксируемые локальные скопления, наполнитель в целом распределен равномерно. Таким образом, композиты на основе компаунда с максимальной степенью наполнения сочетают высокую плотность с микроструктурной однородностью, что делает их наиболее привлекательными для задач радиационной защиты.

1. Organic-inorganic hybrid phase change materials with high energy storage density based on porous shaped paraffin/hydrated salt/expanded graphite composites / H. Lei, X. Wang, Y. Li [et al.] // Energy. – 2024. – Vol. 304. – P. 132169.

2. Robust silicon/carbon composite anode materials with high tap density and excellent cycling performance for lithium-ion batteries / X. Xu, X. Mu, T. Huang [et al.] // J. Power Sources. – 2024. – Vol. 614. – P. 234992.

СПИН-КОАТИНГ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ПОЛИМЕРОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА МЕДИ (II)

Д.В. Сапсалёв[1,2], Г.Б. Мельникова[1], М.Д. Шрубок[1], С.А. Чижик[1]

[1]ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси», Минск, Беларусь; dsapsalev@list.ru

[2]УО «Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка», Минск, Беларусь

Введение

Разработка покрытий на основе смесей полимеров актуальна в связи с необходимостью получения новых функциональных материалов. Введение неорганических нанонаполнителей (SiO_2, CuO, ZnO, TiO_2 и др.) в полимерную матрицу позволяет существенно повысить механическую прочность, износостойкость, а также термическую и УФ-стабильность формируемых покрытий. Важнейшим фактором при создании таких нанокомпозитов является управление межфазным взаимодействием на границе матрица–наполнитель. Регулирование распределения наночастиц в смеси полимеров позволяет не только устранить дефекты структуры, но и добиться синергетического эффекта, превосходящего свойства отдельных компонентов нанокомпозита.

Материалы и методы

Одно- и многослойные полимерные покрытия поливинилкарбазола (ПВК, Sigma-Aldrich, M = 1100000), полиметилметакрилата (ПММА, Sigma-Aldrich, M = 15000) и их смесей с различными массовыми соотношениями формировали методом спин-коатинга на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин. Наночастицы CuO (Sigma-Aldrich, d < 50 нм) вводили в состав рабочих суспензий для формирования покрытий путем смешивания суспензии наночастиц в хлороформе с растворами смесей полимеров заданных соотношений с последующей обработкой ультразвуком в течение 5 минут. Концентрация наночастиц CuO в рабочих суспензиях составляла от 0,03125 мг/мл до 0,25 мг/мл.

Для реализации метода спин-коатинга аликвоту суспензии ПВК–ПММА + CuO прикапывали на подложку, вращающуюся со скоростью 3200 об./мин. Вращение не прекращали в течение 1 минуты (для каждого слоя) с целью удаления остаточных количеств растворителя.

Исследования структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов NSC 11 A (MikroMasch, Эстония) со средней жесткостью 3,0 Н/м и радиусом кривизны кантилевера ≤ 10 нм.

Значения модуля упругости сформированных покрытий рассчитывали на основании данных наноиндентирования по модели Джонсона–Кенделла–Робертса.

Результаты и их обсуждение

На основании данных АСМ установлено, что плотные однослойные спин-коатинг покрытия формируются при содержании наночастиц CuO в рабочей суспензии 0,03125 мг/мл 0,0625 мг/мл и массовом соотношении ПВК–ПММА 10 % – 90 % и 20 % – 80 %. Увеличение количества слоев до 5 и 10 сопровождается ростом числа и размеров конгломератов. Значения модуля упругости для одно, пяти- и десятислойных покрытий ПВК–ПММА + CuO составляют от 400 МПа до 600 МПа.

Заключение

На основании проведенных АСМ-исследований структуры одно- и многослойных пленок состава ПВК–ПММА + CuO установлено, что плотные однородные покрытия формируются при содержании CuO в рабочей суспензии до 0,0625 мг/мл.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Т26КИ-002 от 27.01.2026).

КЕРАМИЧЕСКИЕ СВЯЗКИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ЭЛЕКТРОКОРУНДА

Р.А. Селицкий

ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; sialit072007@mail.ru

Керамическая связка представляет собой соединение химических элементов, которые при спекании образовывают стеклоподобное или фарфороподобное вещество, служащее для связи абразивных зерен шлифовального инструмента. В настоящее время отсутствуют стандарты, которые бы регламентировали состав и качество компонентов для создания керамических связок. Производители экспериментируют с составом связок, чтобы добиться лучших характеристик связки (высокая механическая прочность, термостойкость, химическая инертность, обеспечение самозатачивания, пористость, твердость при динамических нагрузках).

Изучение и создание различных составов керамических связок с заданными параметрами приобретает особую актуальность в свете повышения требований к производительности механической обработки.

Типы керамических связок:

1. Силикатные (стекловидные) связки - наиболее распространённый и технологически освоенный тип. В большинстве случаев они содержат в своем составе оксиды SiO_2–Al_2O_3–Na_2O(K_2O)–B_2O_3. Температура обжига абразивного инструмента на них составляет 1000–1250 °С. Связка формируется за счёт плавления полевошпатового сырья, глины и борного ангидрида с образованием аморфной стекло фазы, обволакивающей зёрна. Достоинства этого типа керамической связки: хорошая самозатачиваемость, низкая стоимость, отработанная технология. Недостатками является ограниченная прочность при скоростях выше 80 м/с, склонность к разупрочнению при длительном термическом воздействии. Для повышения рабочих скоростей в состав вводят дополнительные оксиды Al_2O_3, MgO, CaO. [1, 2].

2. Муллитокорундовые связки.

Основу составляет муллит ($3Al_2O3{\cdot}2SiO_2$) в сочетании с корундовой фазой (α-Al_2O_3α). Обжиг ведётся при 1300–1500 °С. Муллитовая фаза обеспечивает высокую огнеупорность (до 1600 °С) и низкий коэффициент термического расширения, что снижает термические напряжения в круге при высокоскоростном шлифовании. Данный тип связок применяется преимущественно для кругов из белого электрокорунда, работающих на скоростях 80–100 м/с при шлифовании легированных и нержавеющих сталей [2, 3].

3. Стеклокристаллические (ситалловые) связки.

Наиболее перспективный класс для высокоскоростного инструмента. В процессе двухступенчатой термообработки в объёме стекла происходит направленная кристаллизация, и связка приобретает структуру мелкозернистой керамики, пронизанной остаточной стеклофазой.

Прочность на изгиб ситалловых связок достигает 150–200 МПа, что позволяет эксплуатировать круги при скоростях до 120–140 м/с [4, 5].

4. Низкотемпературные боросиликатные связки.

Разработаны специально для кругов из кубического нитрида бора (эльбора, CBN), который начинает окисляться при температурах выше 900–1000 °C. Температура обжига снижена до 680–850 °C. Введение оксидов лития и висмута уменьшает вязкость расплава и обеспечивает качественное смачивание зёрен CBN (кубического нитрида бора), без их термической деградации [5, 6].

5. Трансформационно-упрочнённые связки (ZrO_2-модифицированные).

В стеклокерамическую матрицу вводят 3–8 % субмикронного диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия Y2O3. При распространении трещины в связке происходит мартенситное превращение t→m с увеличением объёма на 4–5 %, что создаёт сжимающие напряжения и тормозит разрушение. Вязкость разрушения K1c возрастает на 30–60 %, а допустимая рабочая скорость достигает 140–160 м/с [4].

Керамические связки остаются одним из ведущих решений для высокоскоростного абразивного инструмента. Разработка и изучение различных составов связок позволила поднять рабочие скорости с 35-50 м/с до 120-160 м/с не теряя в прочности шлифовального круга и точности обработки.

Цель проведенного исследования – изучение совместного влияния содержания в высокопрочной легкоплавкой керамической связке фтористого натрия и оксида лития на прочность абразивной композиции с использованием математических методов планирования эксперимента. В качестве независимых факторов приняты концентрация в связке оксида лития (от 3до 6 масс. %) и содержание в шихте связки фтористого натрия (от 6 до 11 масс. %), а в качестве выходного фактора σ - предел прочности при аксиальном изгибе.

На основании анализа экспериментальных данных установлено, что наибольшее влияние на прочность оказывает оксид лития. Связка содержащая (по массе) 6 % NaF и 3,11 % Li_2O наиболее оптимальна по своему составу, так как при температурах обжига 1000 °C и 1050 °C кривая прочности абразивной композиции стремится к максимальному значению.

1. Бакуль В. Н., Лавренко Я. Г., Майстренко А. Л. и др. Алмазный и эльборовый инструмент: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1988. — 288 с.
2. Худобин Л. В., Булыжев Е. М., Бакунов А. С. и др. Технологии и оборудование для шлифования и полирования. — М.: Машиностроение, 2007. — 416 с.
3. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. — Киев: Наукова думка, 1978. — 207 с.
4. Попов М. Ю., Бакумов М. В., Бурлаков И. А. Исследование влияния наномодификаторов на физико-механические характеристики керамических связок для алмазного и эльборового инструмента // Сверхтвёрдые материалы. — 2021. — № 4. — С. 62–71.
5. Красник В. П., Ковальчук Е. Н. Низкотемпературные стеклокерамические связки для эльборового инструмента // Вестник машиностроения. — 2018. — № 9. — С. 44–48.
6. ГОСТ Р 52587–2006. Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твёрдости. — М.: Стандартинформ, 2007.

ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ СМЕСЕЙ МАГНИЯ И ЛИТИЯ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТАМИ

А. А. Степанюк, Т.В. Плиско, А. В. Бильдюкевич

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

Литий – самый легкий металл, характеризующийся комплексом особых физических и химических свойств, таких как самый высокий окислительно-восстановительный потенциал и высокая удельная теплоемкость по сравнению с другими металлами. Спрос на литий стремительно растет в связи с бурным развитием индустрии электромобилей. В настоящее время литий добывают в основном из рапы соленых озер. Однако в рапе содержится большое количество магния, что затрудняет извлечение лития из из-за схожего радиуса гидратации ионов магния и лития. Таким образом, для эффективного извлечения лития из соленых озер необходимо решить проблему разделения ионов Mg^{2+} и Li^{+} в рапе. В настоящее время для извлечения лития из рапы используется множество методов, таких как осаждение, применение литий-селективных электродов, жидкостная экстракция, мембранные процессы и т. д. В последние годы все больше внимания уделяется технологии мембранного разделения методом нанофильтрации благодаря возможности достижения высокой удельной производительности, селективности и сравнительно невысокой стоимости эксплуатации.

Целью исследования является разработка методов модификации композиционных нанофильтрационных мембран для увеличения эффективности выделения соединений лития из сложных растворов, содержащих соли магния. В ходе работы были разработаны композиционные мембраны для нанофильтрации, модифицированные различными по составу и молекулярной массе полиэлектролитами.

Материалы и методы

Ультрафильтрационная мембрана-подложка была сформована на нетканом полиэфирном материале из раствора составом 20% полисульфона (ПС), 0.5% поливинилпирролидона (Mn=40 кДа, ПВП К-30), 79.5% N,N-диметилацетамида (ДМАА). Модификация мембран проводилась растворами полиэтиленимина (ПЭИ) с молекулярной массой 25 кДа (ПЭИ-25) и 60 кДа (ПЭИ-60), раствором полидиаллилдиметиламмоний хлорида (ПДАДМАХ, Mn=400-500 кДа). Нанесение промежуточного слоя проводили методом адсорбции в режиме перемешивания при контакте с селективным слоем мембраны-подложки в течении 1 часа. Селективный слой на основе полиамида сформировали на поверхности ультрафильтрационной мембраны-подложки методом межфазной поликонденсации с использованием 4% раствор пиперазина (ПИП) в воде и 0,24% раствор тримезоилхлорида (ТМХ) в нефрасе С2.

Результаты и их обсуждение

При формировании слоя из полиэтиленимина с молекулярной массой 25 кДа методом адсорбции на мембране-подложке были получены композиционные ультрафильтрационные мембраны. Угол смачивания по воде определяли методом прикрепленного пузырька. Установлено, что угол смачивания по воде снижается немонотонно с 55º для мембраны-подложки до 37º для мембраны, модифицированной 0,3% раствором ПЭИ-25 и до 51º для мембраны, модифицированной 3% раствором ПЭИ-25. Данные свидетельствуют о том, что степень гидрофильности поверхности селективного слоя модифицированных ПЭИ мембран становится выше, по сравнению с немодифицированной мембраной-подложкой, однако, с ростом концентрации ПЭИ-25 в модифицирующем растворе угол смачивания по воде возрастает, что может быть обусловлено увеличением степени шероховатости поверхности селективного слоя мембраны. Транспортные характеристики ультрафильтрационных мембран были исследованы при фильтрации воды и раствора ПВП К-30 при ΔP=0,1 МПа. Показано, что удельная производительность по воде плавно снижается с 262 $л \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$ до 78 $л \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$ при увеличении концентрации ПЭИ-25 в модифицирующем растворе с 0 до 3 мас.%.

Модифицированные ПЭИ-25 ультрафильтрационные мембраны использовали в качестве мембран-подложек для получения композиционных мембран для нанофильтрации при формировании селективного слоя методом межфазной поликонденсации. Установлено, что при нанесении селективного полиамидного слоя на модифицированных мембранах удельная производительность по воде увеличилась до 70-80 $л \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$ при ΔP=0,5 МПа в сравнении с 18 $л \cdot м^{-}$

$^{2}\cdot ч^{-1}$ для немодифицированной мембраны. Проведено исследование транспортных свойств нанофильтрационных мембран при разделении смеси солей $MgSO_4$ и LiCl в соотношении 20 к 1, общая концентрация солей в растворе – 5 г/л. Фактор разделения достиг значения 36 для мембраны, модифицированной 1% раствором ПЭИ-25.

Для мембран модифицированных полиэтиленимином с молекулярной массой 60 кДа наблюдается та же зависимость по степени гидрофильности, что и ПЭИ-25. Угол смачивания падает с 55º для мембраны-подложки до 25º для мембраны модифицированной 0,5% раствором ПЭИ-60, а далее увеличивается до 28º для мембраны, модифицированной 3% раствором. Удельная производительность по воде снижается с 262 л $м^{-2}$ $ч^{-1}$ до 48 л $м^{-2}$ $ч^{-1}$ при увеличении концентрации ПЭИ-60 в модифицирующем растворе с 0 до 3 мас.%. Мембраны, модифицированные полиэтиленимином с молекулярной массой 60 кДа имеют меньшую удельную производительность по воде (48 $л\cdot м^{-2}\cdot ч^{-1}$) в сравнении с мембранной, модифицированной полиэтиленимином с молекулярной массой 25 кДа (70-80 $л\cdot м^{-2}\cdot ч^{-1}$). Степень гидрофильности так же выше для мембран, модифицированных полиэтиленимином с молекулярной массой 60 кДа.

Установлено, что при формировании селективного полиамидного слоя на мембранах, модифицированных ПЭИ-60 удельная производительность по воде равна 36-38 $л\cdot м^{-2}\cdot ч^{-1}$ при ΔP=0,5 МПа. Определен фактор разделения смеси солей $MgSO_4$ и LiCl в соотношении 20 к 1, общая концентрация солей – 5 $г\cdot л^{-1}$, наибольшее значение достигнуто для мембраны, модифицированной 2% раствором полиэтиленимина 60 кДа и равно 27.

При модификации мембраны-подложки раствором полидиаллилдиметиламмоний хлорида, с последующим созданием селективного слоя на основе пиперазинамида были получены композиционные мембраны для нанофильтрации. Транспортные характеристики исследовались по воде, удельная производительность по воде достигала 28 $л\cdot м^{-2}\cdot ч^{-1}$ при ΔP=0.5 МПа для мембраны, модифицированной 0,3% раствором ПДАДМАХ. Показано, что фактор разделения для данной мембраны в процессе нанофильтрации смеси солей сульфата магия и хлорида лития с общей концентрацией 5 $г\cdot л^{-1}$ и массовым соотношение Mg/Li – 20, составил 79.

Выводы

Установлено, что введение в промежуточный слой поликатионов (ПЭИ, ПДАДМАХ) повышает селективность мембраны при выделении лития из его растворов с солями магния. Выявлено, что композиционные нанофильтрационные мембраны, модифицированные промежуточным слоем из полидиаллилдиметиламмоний хлорида, характеризуются значительно более высоким значением фактора разделения солей лития и магния, что, вероятно, обусловлено более высоким значением дзета-потенциала селективного слоя и усилением вклада эффекта исключения Доннана в механизм селективности.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Национальной академии наук Беларуси (грант № 2026-27-215).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕСИТАЛЛА ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ И ПОЛИРОВКЕ

И.Д. Тычинская, О.Ю. Комякевич

Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, tychinskaya_ id@oim.by

Цель: исследование изменения топологии поверхности тонкой углеситалловой пластины между технологическими этапами механической обработки с использованием монолитного

твёрдосплавного резца.

Методы исследований

Наиболее используемым способом обработки тонких пластин углеситалла для створок искусственных клапанов сердца является механическая абразивная обработка шлифованием с последующим полированием и суперфинишным полированием [1]. При этом с заготовки снимается достаточно большой припуск 30-70 мкм. Данный способ обладает рядом недостатков, главным из которых является достаточно глубокий нарушенный слой, достигающий 10-30 мкм.

Исследование процесса резания хрупких неметаллических материалов показало возможность резания их алмазными резцами в режиме, при котором хрупкий материал начинает вести себя как пластичный, без хаотичного выкрашивания частиц с поверхности обрабатываемого материала, которое происходит при шлифовании от многоточечного касания абразивом обрабатываемой поверхности [2]. Создание твердосплавных и сверхтвердых инструментов на основе карбида вольфрама и нитрида бора, которые обладают большей по сравнению с алмазным инструментом ударной стойкостью, позволило предположить возможность лезвийной обработки углеситалла с их использованием.

Результаты и их обсуждение

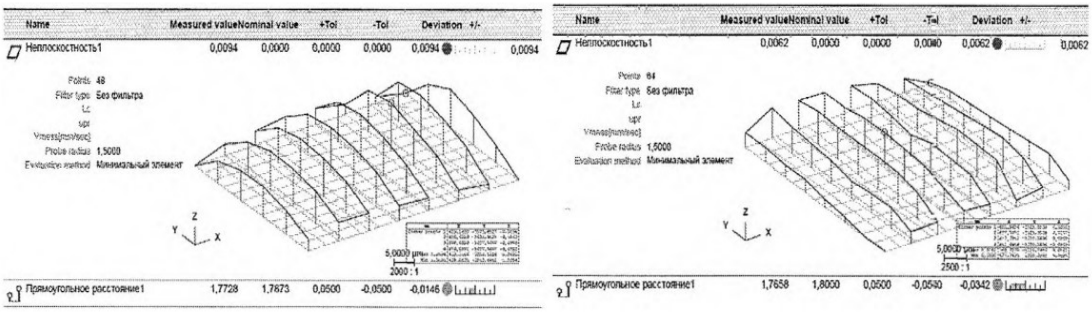
Для реализации процессов лезвийной обработки были использованы: пластины углелиситалла, ТУ-9494-001-476003303-2003 «Элементы запирающие искусственных клапанов сердца и заготовки к ним», имеющие: размеры 25х21,5 мм без фасок по краям, толщиной 1,7 мм; шероховатость заготовки составляла R_a=1,04 мкм. Обработка осуществлялась резцом из волъфрамкобальтового сплава на установке ОАО «Планар» ЭМ-2090 с использованием специальной резцовой головки.

Первый этап механической обработки поверхности тонкой пластины из углеситалла выполнялся высокоскоростной лезвийной обработкой со скоростью 1175 м/мин, снятием припуска 1 мкм за оборот инструмента и подачей пластины в зону резания со скоростью 1 мм/с. Второй этап производился полированием в два этапа на станке доводочном СД-150, предназначенном для полировки створок клапанов сердца, с применением порошка алмазного 3,0 и 1,0.

Исследования топографии обработанных поверхностей осуществлялись с использованием электронного сканирующего микроскопа Teskan Mira, координатно-измерительной машины Prisma Ultra, профилометра Mitutoyo и микроскопа двухкоординатного измерительного ДИП-1.

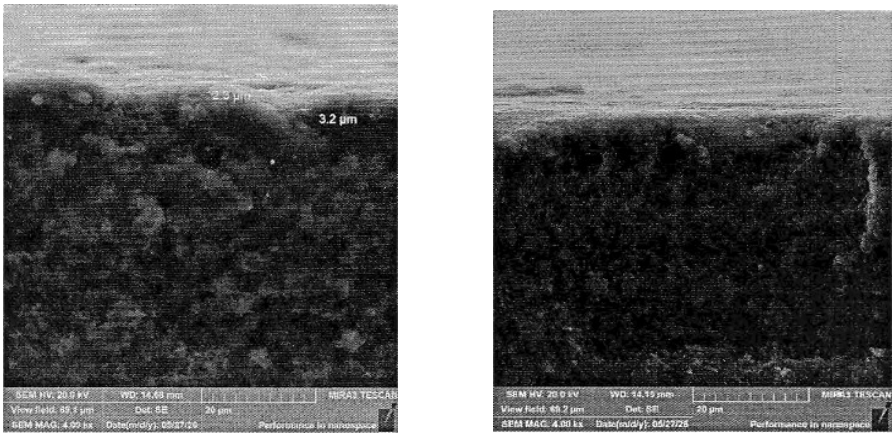
Сравнительный анализ микрогеометрии и отклонений от плоскостности поверхности показан на рисунках 1 и 2.

Анализ результатов лезвийной обработки показал следующее: неплоскостность с 9,4 мкм была улучшена до 6,2 мкм (на 34%), погрешность формы снизилась на 3,2 мкм, величина удаленного припуска составила 7 мкм. Средняя шероховатость поверхности снизилась с R_a = 1,01 мкм до R_a = 0,27 (на 64%). На втором этапе обработки средняя шероховатость снизилась до R_a = 1 04 нм при снятии 9 мкм припуска.



а **б**

Рис.1. **РЭМ-снимки торца поверхности после лезвийной обработки (а) и после полирования (б)**



а **б**

Рис.2. **РЭМ-снимки торца поверхности после лезвийной обработки (а) и после полирования (б)**

Таким образом, анализ результатов исследований показал, что механическая обработка заготовок из углеситалла для изготовления створок к искусственным клапанам сердца может быть осуществлена высокоскоростным лезвийным резанием с использованием волъфрамкобальтового режущего инструмента. Данный вид обработки обеспечивает параметры поверхности, идентичные получаемые при шлифовании и может быть использован в качестве черновой обработки с обеспечением микронеровностей поверхности $R_a = 0\ 3$ мкм и последующим циклом полирования до шероховатости ~ 50-100 нм.

Исследования проведены при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Т25МЭ—020).

1. Fine, R. S. Review of Pyrocarbon Shoulder Hemiarthroplasty: Advances in Shoulder Arthroplasty / R. S. Fine [et a1.] // Journal of Orthopaedic Experience & Inrıovation. — 2024. Vol. 5, № 2. — DOI: https://doi.org/10.60118/001c.120968.
2. Вертаев А.В., Вапезин С.В. Технологические проблемы изготовления и применения углеситалла УСБ в конструкциях эндорпротезов // Вестник Пензенского гос. ун-та, Пенза, Россия, ФГБОУ «Пензенский государственный университет», 2017.
3. Волков, Р. Л. Электронно-микроскопические исследования монокристаллических включений в углеситалле / Р. Л. Волков, Н. И. Боргардт, В. Н. Кукин, А. В. Агафонов, В. О. Кузнецов // Известия РАН. Серия физическая. — 2013. — Т. 77, № 8. — С. 1076-1081. URL: e1ibrary.ru (дата обращения: 03.06.2026).

СТАЛЬНАЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЛОКОРДА: ПРОБЛЕМЫ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

О.Ю. Ходосовская[1], Ю.Л. Бобарикин[2]

[1]ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Беларусь; gsp.icm@bmz.gomel.by

[2]Гомельский государственный университет им ГГТУ им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

Актуальность

Одной из актуальных тенденций на мировом рынке автомобильных шин является использование металлокорда меньшей массы и более высокой прочности [1-3]. Тенденция уже прочно укрепилась на европейском рынке и набирает обороты в странах ЕАЭС. Стремление к развитию производства такой проволоки и изготовленного из нее металлокорда обусловлено не

только экономическими, но и экологическими требованиями к продукции автомобильной промышленности. Дальнейшее повышение прочности выпускаемого металлокорда позволит расширить сортамент и освоить новые виды конкурентоспособной продукции.

Цель

Определение технологической возможности и разработка подходов для повышения прочность стальной латунированной проволоки и изготавливаемого из неё металлокорда, включая достижение уровня прочности свыше 3900 МПа, с сохранением достаточной пластичности для последующей свивки.

Материалы и методы

В качестве исходного сырья использовалась катанка диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистых марок стали с содержанием углерода до 0,96 %. Изготовление металлокорда осуществлялось по следующей технологической цепочке: травление, сухое волочение, патентирование-латунирование, мокрое волочение и свивка металлокорда. Методы исследования включали металлографический анализ микроструктуры с использованием оптических и электронных микроскопов, физико-механические испытания с использованием методов измерения разрывного усилия проволока и металлокорда, общего относительного удлинения, знакопеременных скручиваний.

Результаты и их обсуждение

1. Установлено, что использование высокоуглеродистых марок стали с содержанием углерода до 0,96 % позволяет получить проволоку диаметром 0,30 мм с временным сопротивлением 3790—3870 Н/мм^2, однако пластические свойства (реверсивные скручивания, относительное удлинение) оказываются недостаточными — при свивке металлокорда фиксируются обрывы по типу «расслоение».

2. Ключевым фактором, лимитирующим пластичность, является деформационное старение [4-5], а также структурная неоднородность исходной катанки (разнозернистость до 5—6 баллов), которая приводит к неравномерной деформации по сечению и концентрации напряжений на границах крупных я мелких зёрен, снижая ресурс пластичности при больших суммарных обжатиях.

3. Показано, что патентирование на пониженных скоростях, необходимое для полного растворения карбидов в легированных сталях, вызывает укрупнение зерна [6] и склонность к зернограничному разрушению и, как следствие, к потере пластических свойств проволоки [7-8].

4. Намечены дальнейшие направления работы: оптимизация режимов тонкого волочения для снижения влияния деформационного старения, контроль однородности микроструктуры катанки, а также поиск баланса между легированием, термообработкой и режимами деформации для обеспечения требуемого сочетания прочности и пластичности.

1. Веденеев А.В. Новые направления в развитии металлокорда. — Литые и металлургия. — 2004, 162—165
2. Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В. Перспективные направления совершенствования метизного производства в Республике Беларусь. Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. — М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Ун-т им. Аджинкья Д. Я. Патила; под ред. М. Н. Андриянчиковой. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2023, 138—140 с.
3. Столяров, А.Ю. Разработка конкурентоспособной технологии производства проволоки высокой прочности для армирования автомобильных шин : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.05. — Магнитогорск. — 2013, 16 —18.
4. Фетисов В.П. Структурные аспекты снижения пластичности высокопрочной проволоки при больших суммарных обжатиях. —Литье и металлургия. — 2012, 107 — 109.
5. Бабич В.К. Деформационное старение холоднодеформированной проволоки. — ЭИ «Черметинформация». — 1977.
6. Метизное производство: практ. пособие / под общ. ред. А. Н. Савенка. — Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого.

— 2019.
7. Пейсахов А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебник. — Изд-во Михайлова В.А. — 2003.
8. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия. — 1986.

ТЕРМОСТОЙКИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОГО ФОСФАТНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ПОЛЫХ МИКРОСФЕР

А.Р. Чепцова[1], А.М. Бриштен[1], В.И. Новицкая[1,2], А.Н. Кудлаш[1,2], К.Н. Лапко[1,2]

[1]Белорусский государственный университет (БГУ), Минск, Беларусь; navitskayavi@gmail.com

[2]Учреждение БГУ «НИИ физико-химических проблем», Минск, Беларусь; kudlash@bsu.by

Среди разнообразных теплоизолирующих материалов неорганические композиты способны выдерживать высокие температуры, сохраняя свои свойства: они не горят, не выделяют токсичных продуктов при нагреве, устойчивы к химическому воздействию. Особый интерес в материаловедении представляют композиционные материалы, которые сочетают в себе несколько функций, например, теплоизоляции и термостойкости. Поэтому разработка новых и совершенствование уже известных составов является актуальной задачей. Для получения термостойких материалов в качестве связующего часто применяют фосфатные системы [1, 2]. Они хорошо зарекомендовали себя благодаря способности формировать прочную структуру при относительно невысоких температурах обработки (20–200 °С). Особый интерес представляет использование твёрдого магнийфосфатного связующего (ТМФС) для получения композитов по технологии сухих смесей [3]. С точки зрения придания композитам теплоизолирующих свойств перспективно применение неорганических полых микросфер (ПМС) в качестве функционального наполнителя.

Цель исследования заключается в разработке составов термостойких теплоизолирующих композитов (ТТК) на основе зольных (ЗПМС) и стеклянных полых микросфер (СПМС), дигидрофосфата магния в качестве твердого связующего и основного наполнителя, представленного смесью корунда (К), шамота (Ш) и глинозёмистого цемента (ГЦ); оценке влияния состава и режимов термообработки (включая СВЧ воздействие) на прочность, плотность, термо- и водостойкость материалов.

Методика получения ТТК

Образцы фосфатных ТТК в форме цилиндров (d=30 мм, h=10 мм) изготавливали путем прессования ($p_{уд.}\approx$ 370 кПа) однородной смеси, полученной при воздушно-взвешенном перемешивании твердого связующего, основного и функционального (ЗПМС, СПМС) наполнителей. В роли ТМФС был использован $Mg(H_2PO_4)_2\cdot 4H_2O$. В качестве основного наполнителя применяли корунд (К), шамот (Ш), а также смесь корунда и шамота с высокоглиноземистым цементом (К-ГЦ; Ш-ГЦ). Отверждение полученных ТТК осуществляли тремя способами: 1) на воздухе (φ~40–50 %) в течение 1 сут с последующей термообработкой (ТО) в печи при нагревании до 400 °С (скорость 5 °С/мин, воздушная атмосфера); 2) с использованием микроволновой обработки (СВЧ, P=600 Вт, t=5 мин, импульсный режим, Δt=1 мин) сразу после изготовления образцов; 3) с применением комбинированного режима (СВЧ + ТО). В работе [3] нами было предложено оптимальное содержание компонентов (связующее–наполнитель–ПМС) для данного типа ТТК, что явилось основой для дальнейшего совершенствования составов и режимов обработки композитов.

Методы исследования ТТК

Образцы фосфатных ТТК изучали методами комплексного термического анализа (КТА),

рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Изучение эксплуатационных характеристик композитов включало определение теплопроводности (LFA-метод), прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$), плотности (ρ), термо- и водостойкости.

Результаты

Разработаны и исследованы композиты на основе твёрдого магнийфосфатного связующего и двух типов функциональных наполнителей: ЗПМС (марка «Термоком») и СПМС (марка «Vioterm V-02»). Подобраны оптимальные составы для получения термостойких теплоизолирующих композиций на основе полых микросфер и различных основных наполнителей, а также предложены эффективные режимы отверждения полученных фосфатных композитов.

Установлено, что для получения ТТК на основе ЗПМС оптимальным является состав, содержащий следующие компоненты (мас. %): ЗПМС – 70, ТМФС – 25, наполнитель – 5. В качестве наполнителя для данной серии композитов была использована смесь корунда и глинозёмистого цемента К-ГЦ20 (w(ГЦ)=20 %). Показано, что переход от традиционного способа ТО композитов к СВЧ обработке позволяет повысить прочность образцов на сжатие с 1,7 МПа до 4,9 МПа. При этом использование комбинированного режима отверждения приводит к повышению прочности композитов до 5,7 МПа. Уменьшение содержания ЗПМС в образцах до 60 мас. % с последующим отверждением только при СВЧ воздействии позволяет получать ТТК с прочностью до 8,3 МПа, однако это приводит к уменьшению теплоизолирующей способности материала. Композиты на основе ЗПМС, ТМФС и наполнителя К-ГЦ20 обладают низкой плотностью (0,55–0,60 г/см^3), высокой водостойкостью, значения коэффициентов теплопроводности (λ) образцов варьируются в пределах 0,15–0,28 Вт/(м·К) в температурном интервале 20–800 °С.

Установлено, что образцы ТТК на основе ЗПМС успешно выдержали 20 циклов нагрева-охлаждения (20↔800 °С) в воздушной среде. Отсутствие повреждений подтвердило структурную стабильность и высокую термоциклическую устойчивость материалов.

Изучено влияние температуры обработки в интервале 400–1200 °С на прочность образцов, полученных после первичного СВЧ отверждения. Выявлено, что максимальное значение прочности ($\sigma_{сж} \approx 6,4$ МПа) достигается после обработки композитов до 800 °С, дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению прочности на ~20 %.

Предложен оптимальный состав фосфатной композиции для получения образцов на основе СПМС со следующим содержанием компонентов (мас. %): СПМС – 30, ТМФС – 30, наполнитель – 40. В этой серии композитов в качестве наполнителя был использован Ш-ГЦ5, представляющий собой смесь шамота и глинозёмистого цемента (w(ГЦ)=5 %). Исследованы эксплуатационные свойства разработанных составов: прочность, плотность, теплопроводность и водостойкость. Установлено, что наиболее перспективные составы характеризуются $\sigma_{сж} \approx 3,2$–3,8 МПа, $\rho \approx 0,42$–0,52 г/см^3, $\lambda \approx 0,2$–0,3 Вт/(м·К). Изучено влияние температуры обработки на прочностные свойства ТТК. Показано, что термообработка образцов при 600 и 800 °С повышает предел прочности на сжатие на 20–30 % по сравнению с ТО при 400 °С. Предложен эффективный способ отверждения образцов ТТК на основе СПМС с применением СВЧ обработки, что позволяет получать теплоизолирующие материалы, не требующие дальнейшей термической обработки.

Таким образом, разработаны составы ТТК на основе зольных и стеклянных ПМС, магнийфосфатного связующего и смешанных наполнителей, представленных смесью корунда, шамота и глинозёмистого цемента; предложены эффективные способы отверждения образцов, включая СВЧ и термообработку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь, ГПНИ «Химические процессы и технологии», НИР № гос. рег. 20261333.

1. Судакас Л. Г. Фосфатные вяжущие системы. – СПб.: «Квинтет». – 2008.
2. Dong X., Wang M., Tao X. [et al.] Properties of heat resistant hollow glass microsphere/phosphate buoyancy materials with different coatings // Ceram. Int. – 2019 (**46**), №. 1, 415−420.
3. Апанасевич Н. С., Сокол А. А., Кудлаш А. Н. [и др.]. Термостойкие теплоизолирующие композиционные материалы на основе полых микросфер и твердых фосфатных связующих: разработка и исследование // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2022, № 2, 70–82.

НАНОТВЁРДОСТЬ TiAlCuN, TiAlCuCN ФОРМИРУЕМЫХ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

И.В. Чижов[1], Ф.Ф. Комаров[2], С.В. Константинов[2], В.А. Зайков[1]

[1]Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь; chyzhouiv@bsu.by

[2]Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

Цель

Установить влияние состава мишени, режима реактивного распыления и легирования углеродом на нанотвёрдость и упругие характеристики нанокомпозитных покрытий TiAlCuN и TiAlCuCN для узлов трения космической техники.

Материалы и методы

Покрытия толщиной 1,1–2,1 мкм формировали реактивным магнетронным распылением на установке УВН-2М с модульным комплексом управления расходом реактивных газов на подложках из титана ВТ1-0. Использовали композитные мишени Ti–Al–Cu, изготовленные импульсным прессованием: № 3 (Ti 46, Al 46, Cu 8 ат. %, Ti:Al ≈ 1:1) и № 4 (Ti 69, Al 23, Cu 8 ат. %, Ti:Al ≈ 3:1). Осаждение проводили в среде Ar–N_2 (TiAlCuN) и Ar–N_2–C_2H_2 (TiAlCuCN) при токе разряда 1,0 А, давлении $7{,}0\cdot10^{-2}$ Па, напряжении смещения –200 В и температуре подложки 370–380 °С в двух режимах: режим 1 – степень реактивности α = 0,605 (состав, близкий к стехиометрическому), режим 2 – α = 0,474 (дефицит реактивного газа). Элементный состав определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, фазовый – рентгеноструктурным анализом. Нанотвёрдость H и модуль Юнга E определяли по методике Оливера–Фарра [1] на приборе Nano Hardness Tester NHT2 индентором Берковича при максимальной нагрузке 50 мН (глубина вдавливания 0,36–0,41 мкм), ν = 0,3. Индекс H/E^* и долю упругого восстановления W_e рассчитывали по кривым нагрузки–разгрузки [2].

Результаты и их обсуждение

Покрытия имеют однофазную нанокристаллическую структуру неупорядоченного твёрдого раствора (Ti,Al)N и (Ti,Al)(C,N) с ГЦК-решёткой типа NaCl; рефлексов меди и медьсодержащих фаз не обнаружено, что указывает на сегрегацию Cu по границам кристаллитов [3, 4]. Содержание меди в покрытиях составляет 6,2–10,3 ат. %, углерода – 1,8–3,7 ат. % в нитридах и 8,8–20,8 ат. % в карбонитридах.

Нанотвёрдость покрытий составила H = 25,4–35,4 ГПа, модуль Юнга E = 176–268 ГПа (табл. 1). Отпечатки индентора имеют правильную форму, трещин и сколов вокруг них нет, что свидетельствует о высокой трещиностойкости покрытий. Максимальная твёрдость H = 35,4 ГПа при H/E^* = 0,14 и W_e = 66,8 % получена для нитрида 3N1, сформированного в режиме 1 из мишени № 3 при отношении (Ti+Al)/(N+C) = 0,976. Формирование покрытий с составом, близким к стехиометрическому (отношение ≈ 1), способствует росту твёрдости, а обогащение металлами и дефицит азота в режиме 2 снижают её.

Таблица 1**. Состав и микромеханические свойства покрытий TiAlCuN и TiAlCuCN**

Образец	Cu, ат. %	C, ат. %	(Ti+Al)/(N+C)	*H*, ГПа	*E*, ГПа	H/E^*	W_e, %
3N1	8,07	2,47	0,976	35,4	235,9	0,14	66,8
3N2	9,95	1,77	1,233	31,3	267,6	0,11	58,1
4N1	8,59	3,68	0,993	31,0	265,1	0,11	49,4
4N2	10,32	3,60	1,791	29,3	256,4	0,10	47,2
3CN1	7,01	20,81	0,873	29,0	176,3	0,15	67,9
3CN2	7,32	15,56	1,295	27,1	247,7	0,10	62,1
4CN1	6,15	18,14	1,234	28,9	240,9	0,11	49,1
4CN2	7,54	8,77	1,935	25,4	249,8	0,09	43,6

Примечание. Образец: первая цифра – номер мишени, N/CN – нитрид/карбонитрид, вторая цифра – режим (1: α = 0,605; 2: α = 0,474).

Как видно из рис. 1, покрытия, полученные из мишени № 3, в среднем на 7 % твёрже покрытий из мишени № 4 (30,7 и 28,6 ГПа) и имеют на 35 % большую долю упругого восстановления. Твёрдость в режиме 1 на 10 % выше, чем в режиме 2. Более твёрдые образцы отличаются менее выраженной кристаллографической упорядоченностью нанокристаллитов, а твёрдость снижается с ростом скорости осаждения (0,32–0,71 нм/с), что связано с уменьшением плотности покрытия.

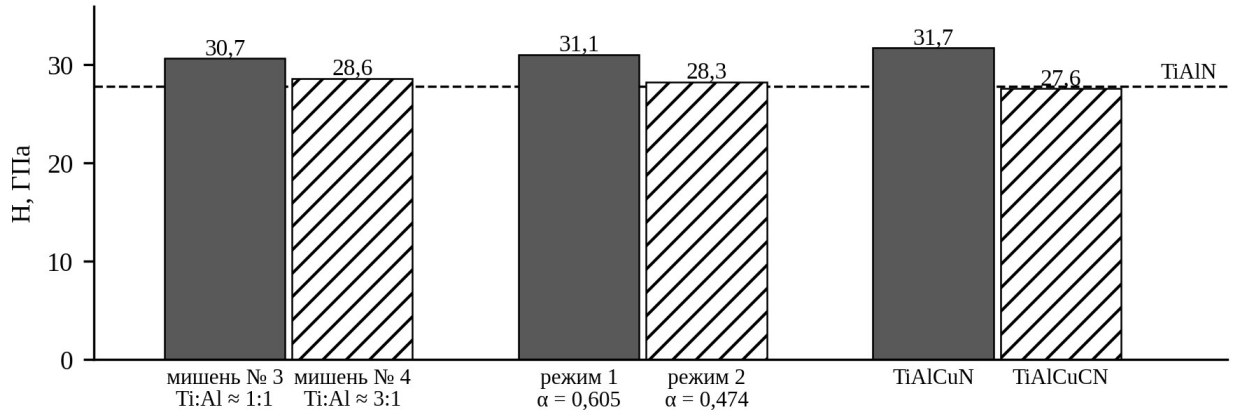


Рис. 1. **Влияние мишени, режима осаждения и легирования углеродом на среднюю нанотвёрдость покрытий (штриховая линия – TiAlN, 27,8 ГПа)**

Введение углерода снижает среднюю твёрдость на 13 % (с 31,7 до 27,6 ГПа) и модуль Юнга на 11 %, однако карбонитриды остаются достаточно твёрдыми (H = 25,4–29,0 ГПа) и, по данным трибологических испытаний, обеспечивают на 12 % меньший коэффициент трения и на 59 % меньшую глубину трека износа. В среднем твёрдость медьсодержащих покрытий на 7 % выше, чем у TiAlN (29,7 против 27,8 ГПа), при этом модуль Юнга на 13 % ниже, поэтому индекс H/E^* возрастает на 26 % (0,114 против 0,090), а для образцов 3N1 и 3CN1 достигает 0,14–0,15.

Заключение

Оптимальное сочетание нанотвёрдости (H = 35,4 ГПа), стойкости к пластической деформации и упругого восстановления (W_e = 66,8 %) показывают покрытия TiAlCuN, полученные из мишени с Ti:Al ≈ 1:1 в режиме, близком к стехиометрическому. Легирование углеродом (TiAlCuCN) несколько снижает твёрдость, но улучшает трибологические характеристики, что делает такие покрытия перспективными для износостойких элементов космической техники.

1. 1 Oliver W.C. and Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. — 1992 (7), № 6, 1564—1583.
2. 2 Leyland A. and Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. — 2000 (246), 1—11.
3. 3 Константинов С.В., Комаров Ф.Ф., Чижов И.В., Зайков В.А. Структурно-фазовые состояния и микромеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN // Докл. НАН Беларуси. — 2023 (67), № 2, 101—110.
4. 4 Komarov F.F., Konstantinov S.V., Chizhov I.V., Zaikov V.A., Zubar T.I., Trukhanov A.V. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions // RSC Adv. — 2023 (13), 18898—18907.

СИНТЕЗ КОНЪЮГАТОВ ХИТОЗАН-САЛИЦИЛОВАЯ КИСЛОТА

Д. В. Чикуёнок, К. С. Гилевская

ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси», Минск, Беларусь; dasha.eva.kysa@mail.ru

Введение

Хитозан привлекает все больше внимания исследователей благодаря своей биоразлагаемости и биосовместимости. Салициловая кислота – природное и безопасное фенольное вещество, конъюгация которой с хитозаном позволяет создать материалы с улучшенными харакетристиками. такими как антиоксидантная активность, растворимость и другими. [1, 2]

Цель

Синтез конъюгатов хитозана с салициловой кислотой с различным мольным соотношением хитозан/салициловая кислота и исследование их свойств.

Материалы и методы

В работе использовали хитозан (Хит, 30 кДа, Glentham Life Sciences, Великобритания), салициловую кислоту (СК, ЭксимЛаб, РБ), 1-этил-3-(3-диметиламинопропил)карбодиимид (EDC, Macklin, КНР), N-гидроксисукцинимид (NHS, Macklin, КНР). Синтез конъюгатов проводили карбодиимидным методом варьируя мольные соотношения СК : NH_2 от 0,25 до 1,25, pH среды и тип растворителей для полимера и фенольной кислоты. Готовые продукты очищали диализом против дистиллированной воды или смеси этиловый спирт/вода и лиофильно высушивали. Степень модификации (СМ, %) определяли методом прямой УФ-спектрометрии, методом Фолина-Чокольтеу, а также ^{1}H-ЯМР.

Результаты и обсуждение

Успешное протекание реакции ацилирования с образованием ковалентной амидной связи (-CONH-) между аминогруппами полимерной матрицы хитозана и карбоксильными группами салициловой кислоты доказано методами ^{1}H-ЯМР и ИК-НПВО спектроскопии. В ИК-спектрах ковалентное связывание подтверждается дозозависимой трансформацией полос поглощения протонированных аминогрупп хитозана при 1520 см$^{-1}$ (рис. 1) и закономерным ростом интенсивности пиков салицилатного фрагмента при 1380 и 760 см$^{-1}$. Прямая идентификация полос вновь сформированных амидных групп (Амид I и II) затруднена из-за их сильного перекрывания с поглощением остаточных ацетамидных звеньев, ароматического кольца и связанной воды.

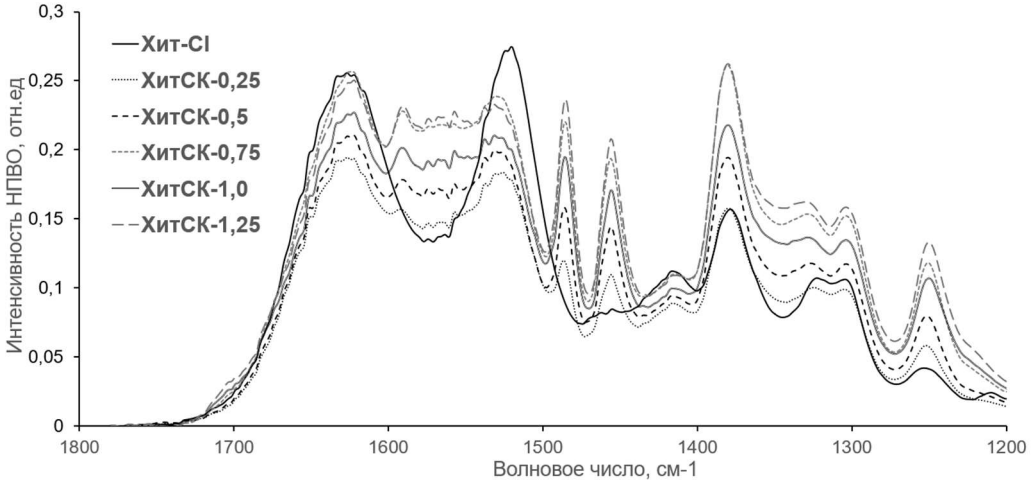


Рис. 1. **ИК-НПВО спектры пленок исходного гидрохлорида хитозана и его конъюгатов с СК**

По данным ЯМР степень модификации в ряду полученных образцов закономерно возрастает от 16,67% до 44,92% с увеличением избытка ацилирующего агента в синтезе (табл.1). При мольном соотношении СК:NH_2 ≤ 0,75 экспериментально определяемая СМ по методу Фолина-Чокальтеу превышает данные ЯМР, достигая 34,96% для образца ХитСК-0,75 (Δ = -3,32%). Данный феномен обусловлен тем, что формирование амидного линкера разрушает жесткую внутримолекулярную водородную связь свободной СК, деблокируя фенольный гидроксил, чья электрон-донорная способность дополнительно усиливается за счет электронного синергизма с соседними аминогруппами хитозана.

Таблица 1. **Значения СМ, установленные методами УФ-спектроскопии, спектрофотометрии с реактивом Фолина-Чокальтеу и ^{1}H-ЯМР**

Код образца	Мольное соотношение СК : NH_2 в синтезе	СМ, %			Разность методов d(ЯМР – Ф-Ч), %	Разность методов d(ЯМР – УФ), %
		метод 1H-ЯМР	метод УФ-спек-ии	по методу Фолина-Чокальтеу		
ХитСК-0,25	0,25	16,67	12,00	21,22	-4,55	4,67
ХитСК-0,50	0,50	22,32	16,50	29,68	-7,36	5,82
ХитСК-0,75	0,75	31,64	23,80	34,96	-3,32	7,84
ХитСК-1,00	1,00	37,01	27,00	34,72	2,28	10,01
ХитСК-1,25	1,25	44,92	28,10	35,47	9,45	16,82

При избытке салициловой кислоты в синтезе наблюдается расхождение между методами анализа: кажущаяся степень модификации по методу Фолина-Чокальтеу выходит на плато (35,47% для ХитСК-1,25), тогда как истинная СМ по данным ^{1}H-ЯМР продолжает линейно расти до 44,92%. Данный эффект обусловлен конформационными изменениями макроцепей. Накопление гидрофобных ароматических фрагментов инициирует внутримолекулярное сворачивание макромолекул, приводя к стерическому экранированию части ковалентно связанных салицилатных групп внутри полимерных клубков. Процесс сопровождается уширением полосы поглощения в УФ-спектрах вследствие меж- и внутримолекулярного π-π-стекинга сближенных бензольных колец. Обусловленное этим падение экстинкции в максимуме поглощения приводит к недооценке СМ оптическими методами (23,80% для образца ХитСК-0,75, Δ = 7,84%). Результаты ИК-НПВО спектроскопии согласуются с данными метода Фолина-Чокальтеу: замедление роста аналитического сигнала после соотношения 0,75 указывает на предел насыщения приповерхностного слоя пленок доступными фенольными гидроксилами при фиксации конформации сополимера.

Выводы

Разработана методика получения водорастворимых гидрохлоридов конъюгатов хитозана с салициловой кислотой с регулируемой степенью модификации (17–45%). Совместное применение методов ^{1}H-ЯМР, ИК-НПВО и спектрофотометрии позволило разграничить вклад ковалентного связывания и конформационных изменений полиэлектролитных цепей при изменении состава систем. Полученные полимеры перспективны для создания новых биосовместимых материалов с контролируемыми антиоксидантными и гидрофобными свойствами

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Химические процессы и технологии» в рамках задания 2.4.1 НИР 1.

1. Fei H. [et al.]. Functional properties of chitosan films with conjugated or incorporated salicylic acid // Journal of Molecular Structure. – 2021 (**1223**).
2. Yang X., Lan W. and Sun X. Antibacterial and antioxidant properties of phenolic acid grafted chitosan and its application in food preservation: a review // Food Chemistry. – 2023 (428).

Секция 2

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТОНКИХ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО САПФИРА

Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик, И.Д. Тычинская

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь; asrtrashabev@mail.ru

Сапфир представляет собой разновидность оксида алюминия (корунд, α-Al_2O_3), характеризующуюся высокой твёрдостью (9 по шкале Мооса), термической стабильностью, износо- и химической стойкостью, а также выраженными диэлектрическими свойствами. Технический сапфир является бесцветным прозрачным материалом с высокой степенью светопропускания. Кристаллическая решётка сапфира относится к тригональной сингонии [1, 2].

Благодаря комплексу физико-химических и оптических свойств сапфир широко применяется в оптических системах (линзы, защитные окна, экраны, световоды), а также в микроэлектронике (пластины и подложки для светодиодов) [1–3]. Вместе с тем рабочие поверхности пластин монокристаллического сапфира требуют длительной и технологически сложной механической обработки с применением специальных режимов и инструмента.

Параметры механической обработки и достигаемое качество поверхности существенно зависят от кристаллографического направления выращивания монокристалла и ориентации вырезки пластин (рис. 1 [4]). В частности, скорость съема материала уменьшается в ряду: C-plane > M-plane > A-plane > R-plane [4]. В связи с этим, при подборе оптимальных режимов механической обработки, необходимо учитывать и контролировать кристаллографическую ориентацию пластин сапфира. Таким образом, целью настоящей работы являлось определение направления вырезки пластин монокристаллического сапфира.

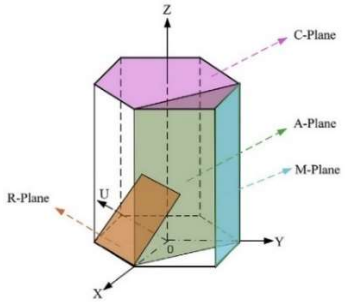


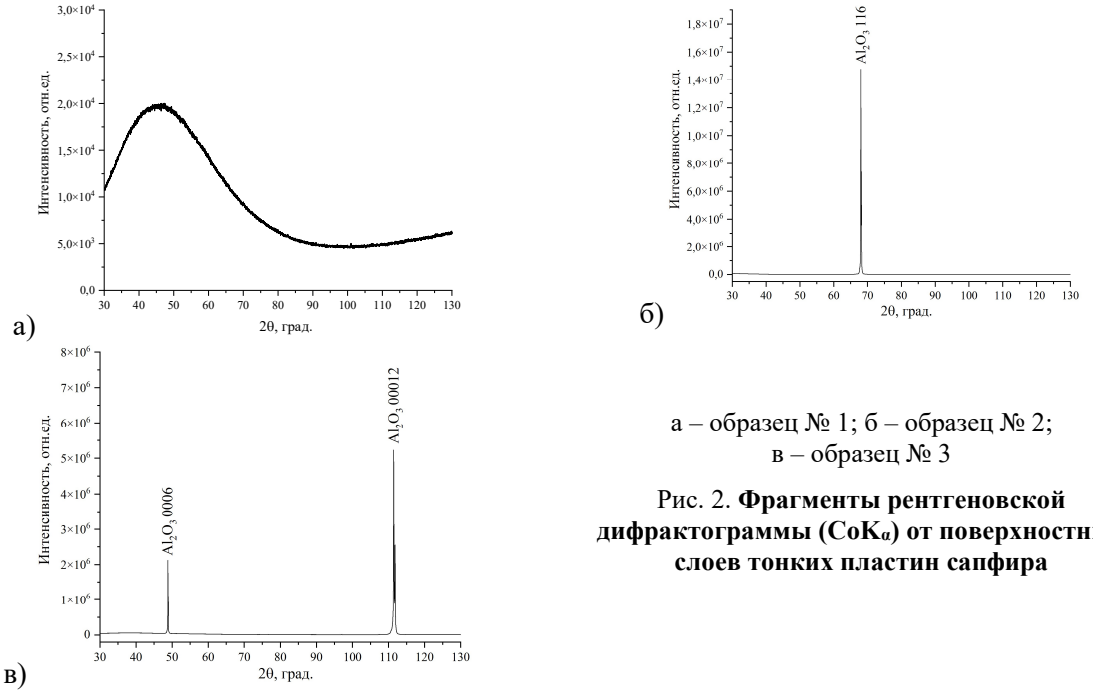
Рис. 1. **Основные кристаллографические плоскости сапфира**

Объектом исследования являлись пластины диаметром 10 см и толщиной ≈ 1 мм, вырезанные из различных заготовок монокристаллов сапфира. Кристаллографическая плоскость, в которой были вырезаны образцы, определялась качественным рентгеноструктурным анализом с использованием дифрактометра POWDIX 600 и монохроматизированного кобальтового (CoK_α) излучения при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм выполнялась с помощью программного обеспечения Almaz с использованием картотеки PDF-2.

Результаты рентгеноструктурного анализа различных пластин сапфира представлены на рис. 2. На представленных дифрактограммах можно видеть, что поверхность образца № 1 имеет аморфное строение (рис. 2а). Отсутствие отражений рентгеновского излучения от каких-либо кристаллографических плоскостей связано с невыполнением условия Вульфа-Брэгга при рентгеновской съемке, что свидетельствует о вырезке образца № 1 в произвольном направлении относительно его кристаллической решетки, либо

формировании рентгеноаморфного поверхностного слоя в процессе механической обработки пластины (вырезке, шлифовании).

На дифрактограмме от образца № 2 (рис. 2б) регистрируется интенсивный пик при 2Ѳ ≈ 68,01°, который соответствует плоскости (116) α-Al_2O_3. При этом плоскость (116) не относится к наиболее распространённым технологическим плоскостям типа c-, a-, r- или m-plane. Дифрактограмма образца № 3 (рис. 2в) включает в себя два пика при 2Ѳ ≈ 48,82° и 111,42°, соответствующие плоскостям (0006) и (00012). Наличие указанных плоскостей свидетельствует о том, что образец № 3 вырезан перпендикулярно оси Z и обладает стандартной ориентацией C-Plane.



а – образец № 1; б – образец № 2;
в – образец № 3

Рис. 2. **Фрагменты рентгеновской дифрактограммы (CoK$_\alpha$) от поверхностных слоев тонких пластин сапфира**

Таким образом, в результате рентгеноструктурного анализа различных образцов, вырезанных из монокристаллов сапфира, можно сделать вывод, что образец № 3 является лучшим вариантом для дальнейшего подбора режимов механической обработки.

Заключение. В результате проведенного качественного рентгеноструктурного анализа установлено кристаллографическое направление вырезки исследуемых пластин монокристаллического сапфира. Показано, что образец № 3 характеризуется ориентацией C-Plane, что подтверждается отражением рентгеновского излучения от плоскостей (0006) и (0012), соответствующих вырезке перпендикулярно оси Z.

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ № Т25МЭ-019 (2025-2027 г.).

1. Sapphire: Material / E.R. Dobrovinskaya, L.A. Lytvynov, V. Pishchik // Manufacturing, Applications. – 2009. – № 7. – pp. 64–65.
2. Study on mechanism of crack propagation of sapphire single crystals of four different orientations under impact load and static load / K. Wang, F. Jiang, L. Yan, X. Xu, N. Wang, X. Zha, X. Lu, Q. Wen // Ceram. Int. – 2019. – 45. – pp. 7359–7375.
3. Plasticity and fracture of sapphire at room temperature: load-controlled microcompression of four different orientations / A. Montagne, S. Pathak, X. Maeder, J. Michler // Ceram. – 2014. – Int. 40. – pp. 2083–2090.
4. Crystalline orientation effects on material removal of sapphire by femtosecond laser irradiation / Q. Wen, P. Zhang, G. Cheng, F. Jiang, X. Lu // Ceramics International. – 2019. – Vol. 45 – Issue 17, Part B – P. 23501-23508.

ЦИФРОВОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ СЕНСОР МЕТАНА: ПРИНЦИП, ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРЕКЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ

Э.М. Ахметова[1,2], Б.Р. Буляков[1,2], Д.И. Шарафетдинов[1,2], Х.М. Салихов[2], Н.Д. Стоянов[3], С.С. Молчанов[3], Ю.Г. Малинин[2], Е.Н. Дулов[1,2], М.Х. Салахов[2], Л.Р. Тагиров[1,2]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; ahmetova.elvina.18@gmail.com

[2]Институт прикладных исследований АН РТ, Казань, Россия;

[3]ООО ЛЕД Микросенсор НТ, Санкт-Петербург, Россия

Цель

Целью работы является обобщение принципов построения цифрового оптико-электронного сенсора метана, включая метод коррекции температурного дрейфа по дифференциальному сопротивлению фотодиода, а также анализ практических приложений таких сенсоров в бытовой и автомобильной газовой безопасности. В основу положены две работы: [1] и [2].

Описание принципа

Метан интенсивно поглощает инфракрасное излучение в средней ИК-области, в полосе 3,2–3,4 мкм, что используется для оптического детектирования. В сенсоре применяется оптопара: светодиод среднего ИК-диапазона и спектрально согласованные с ним фотодиоды — опорный и измерительный. Такая схема позволяет отказаться от тепловых источников излучения и дорогостоящих узкополосных светофильтров, обеспечивая компактность, низкое энергопотребление и высокое быстродействие [2].

Одной из ключевых проблем оптических сенсоров является температурный дрейф чувствительности ИК-фотодиода. В опубликованной ранее работе [1] предложено измерять температуру фотодиода по его дифференциальному сопротивлению *rd(T)*. Для этого фотовольтаический режим с операционным усилителем дополняется малым контролируемым смещением ΔV, превышающим сдвиг нуля операционного усилителя (ОУ). Выходной сигнал оказывается пропорционален дифференциальной проводимости:

$$V = \Delta V \frac{R}{r_d} \sim T^2 e^{-\frac{E_g}{2kT}}. \quad (1)$$

Такой подход позволяет отслеживать температуру с точностью до 0,1 °C, исключая влияние градиента температуры и необходимость отдельного термодатчика [1].

Экспериментально в [1] использованы узкозонные InAs/InAsSbP-фотодиоды, оптическая ячейка длиной 36 мм, пара Lms34LED–Lms36PD, операционный усилитель TP8606ARZ и микроконтроллер STM32F103C8B8 с 12-битным АЦП. Измерения проводились на частоте 1 кГц с чередованием включения и выключения светодиода: разность сигналов давала информацию о поглощении, а сигнал при выключенном светодиоде — о температуре. После фильтра Калмана 1-го порядка с постоянной времени 1 с и температурной коррекции в диапазоне +5…+45 °C на тестовой смеси 1 об.% метана в азоте достигнута точность измерения объёмной доли метана 1000 ppm [1].

Применение на практике

В [1] метод ориентирован на оптический сенсор бытового газа: он упрощает конструкцию за счёт отказа от отдельного термодатчика и снижает влияние температурного дрейфа и градиента. В [2] сенсор адаптирован для газомоторного автотранспорта: передатчик размещается у газового баллона или редуктора, приёмник-сигнализатор — на приборной панели; данные передаются по беспроводному каналу. Порог срабатывания

установлен на 0,1 об.% CH_4 (1000 ppm), предусмотрены световая и звуковая индикация, а также пороги 0,1/0,5/2 об.% CH_4. Сенсор работает при –40…+70 °C, потребляет 2–6 мА и может устанавливаться в автомобиль без вмешательства в штатную электрическую схему [2].

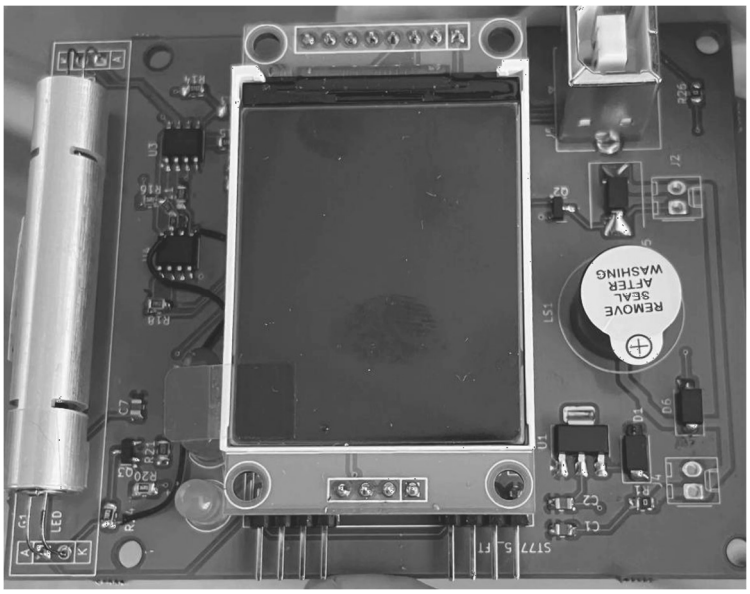


Рис. 1. **Прототип тестовой сборки сенсора метана на отладочной плате с возможностью отображения данных о концентрации метана на дисплее**

Выводы

Оптико-электронный сенсор метана на светодиодах и фотодиодах среднего ИК-диапазона обеспечивает высокую селективность, быстродействие, низкое энергопотребление и пожаробезопасность [1, 2]. Коррекция температурного дрейфа по дифференциальному сопротивлению фотодиода позволяет измерять температуру с точностью 0,1 °C, исключает отдельный термодатчик и влияние градиента температуры; в диапазоне +5…+45 °C достигнута точность 1000 ppm на смеси 1 об.% метана в азоте [1]. Практические реализации пригодны как для бытового контроля газа, так и для газомоторного транспорта: беспроводная передача данных, пороги 0,1/0,5/2 об.% CH_4, работа при –40…+70 °C и возможность интеграции в цифровые системы автомобиля [2]. Перспективными остаются более полное использование цифровой обработки сигнала и аппроксимация рабочего выражения простыми для микроконтроллера функциями [1].

1. Шарафетдинов Д.И., Салихов Х.М., Стоянов Н.Д., Молчанов С.С., Ахметова Э.М., Дулов Е.Н., Ямщикова В.А., Малинин Ю.Г., Буляков Б.Р., Салахов М.Х., Тагиров Л.Р. Коррекция температурного дрейфа показаний оптического сенсора бытового газа / [Электронный ресурс]. — 5.
2. Салихов Х.М., Малинин Ю.Г., Дулов Е.Н., Шарафетдинов Д.И., Ахметова Э.М., Буляков Б.Р., Тагиров Л.Р., Салахов М.Х., Молчанов С.С., Стоянов Н.Д. Цифровой оптико-электронный сенсор метана для автотранспорта на газомоторном топливе // Сборник материалов международный форум KAZAN DIGITAL WEEK. – 2025 (**1**), 162–167.

ПОРОВАЯ СТРУКТУРА ОДНОСЛОЙНЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ

Д.В. Брель[1] В.А. Стратанович[1] В.Ю. Гарбарук[1,2]

[1]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь; brel.dmitriy@mail.ru

[2]ОДО «НТЦ Ларта», Гомель, Беларусь

Цель

Разработка фильтрующих систем требует детального понимания структурных особенностей и фильтрационных характеристик отдельных слоев [3]. Эффективность газовой фильтрации определяется комплексом структурных параметров фильтрующего материала, среди которых ключевую роль играет распределение пор и газопроницаемость [1,2].

Настоящее исследование посвящено изучению пористой структуры и газопроницаемости однослойных волокнисто-пористых материалов (ВПМ).

Материалы и методы

Исследованы следующие материалы: металлический войлок из нержавеющей стали AISI 316L с тонкостью фильтрации 3 и 5 мкм (МВН-3, МВН-5), стеклобумага фильтровальная Н13 и Н14, композитное стекловолокно кН13, полиэфирный материал PES-450OGF, полиакрилонитрильный материал AR-400OGF, волокнисто-пористый материал на основе полипропилена (МБ) и ВПМ «Грифтекс» на основе фторопласта.

Определение размера пор, их распределение по размерам и газопроницаемость проводили методом газожидкостной порометрии на приборе «POROLUX 500».

Результаты и их обсуждение

Анализ данных газожидкостной порометрии (табл. 1) выявил значительные различия в пористой структуре исследованных материалов. Максимальный размер пор варьируется от 8,86 мкм (Н13, кН13, Н14) до 99.87 (ВПМ «Грифтекс), средний размер – от 3,05 мкм (Н13) до 26,65 мкм (МБ). Коэффициент газопроницаемости изменяется в весьма широком диапазоне: от 0,85 мкм^2 (Н14) до 19,64 мкм^2 (МБ).

Все виды стеклобумаги демонстрируют близкие значения размеров пор. Однако наличие полимерного связующего в кН13 увеличивает газопроницаемость до 1,4 мкм^2 по сравнению с Н13 (0,92 мкм^2) и Н14 (0,85 мкм^2).

Таблица 1. **Характеристики поровой структуры исследуемых материалов**

Образец	Максимальная пора, мкм	Средняя пора, мкм	Минимальная пора, мкм	Фактическая толщина, мм	Коэффициент газопроницаемости, мкм^2
МВН-3мкм	10,39	4,18	3,43	0,67	4,495
МВН-5мкм	16,33	5,84	4,56	0,65	4,100
Н13	8,86	3,05	2,44	0,5	0,92
Н14	8,86	3,05	2,32	0,5	0,85
кН13	8,87	3,27	2,57	0,7	1,4
PES-450OGF	56,09	22,94	7,59	1,5	11,3
AR-400 OGF	52,15	15,49	7,88	2,4	14,03
МБ	57,09	26,65	5,22	0,75	19,64
Грифтекс	99,87	15,43	6,1	0,9	4,23

Полимерные ВПМ PES-450OGF и AR-400OGF, несмотря на близкую природу, различаются по структуре: средний размер пор PES-400OGF в 1,5 раза больше, чем у AR-

400OGF, однако газопроницаемость AR-400OGF выше благодаря более эффективной структуре порового пространства.

ВПМ МБ обладает самой высокой газопроницаемостью (19,64 мкм^2) при широком распределении пор (5…45 мкм). ВПМ «Грифтекс» несмотря на максимальный размер пор 99,87 мкм, имеет газопроницаемость (4,23 мкм^2), сопоставимую с металлическим войлоком, благодаря высокой плотности упаковки.

Выводы

Анализ полученных результатов позволил установить характерные особенности пористой структуры и газопроницаемости однослойных волокнисто-пористых материалов различных классов. Выявлены четкие корреляции между параметрами поровой структуры и газопроницаемостью. Полученные результаты являются основой для дальнейшего проектирования конструкций многослойных фильтрующих элементов.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ договор №Т25М-033 «Влияние параметров пористой структуры на фильтрующие характеристики многослойных волокнисто-пористых систем металл/полимер при фильтрации газожидкостных потоков».

1. Charvet A., Gonthier Y., Bernis A., Gonze E. Filtration of liquid aerosols with a horizontal fibrous filter // Chemical Engineering Research and Design, 2008, vol. 86, is. 6, pp. 569–576. doi: 10.1016/j.cherd.2007.11.008
2. Анисович А. Г., Буйницкая А. С. Стандартные методы определения пористости материалов (обзор) // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2015. № 2. С. 30−36.
3. Шумская В. Ю. Повышение эффективности волокнисто-пористых многослойных полимерных фильтроматериалов для газотранспортного оборудования : дис. … канд. техн. наук : 05.16.09 / Гомель, 2023. – 166 л.

ПОРОВАЯ СТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ

Д.В. Брель[1] В.А. Стратанович[1] В.Ю. Гарбарук[1,2]

[1]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь; brel.dmitriy@mail.ru

[2]ОДО «НТЦ Ларта», Гомель, Беларусь

Цель

Создание высокоэффективных фильтрующих систем требует комплексного подхода к проектированию их структуры [1]. Многослойные металл-полимерные волокнисто-пористые системы (ВПС) представляют особой интерес благодаря уникальному сочетанию механической прочности, химической стойкости и возможности регулирования газопроницаемости за счет выбора компонентов и порядка их расположения [2]. Настоящее исследование посвящено изучению влияния расположения слоев ВПС на газопроницаемость и поровую структуру.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны двух и трехслойные комбинации из следующих материалов: металлический войлок из нержавеющей стали (МВН), композитная стеклобумага с классом фильтрации Н13 (кН13), волокнисто-пористый материал «Грифтекс» на основе фторопласта.

Определение размера пор, их распределение по размерам и газопроницаемость

проводили методом газожидкостной порометрии на приборе «POROLUX 500».

Результаты и их обсуждение

Анализ данных (табл. 1) показал, что формирование многослойных систем из различных компонентов приводит к изменению характеристик пористой структуры. Максимальный размер пор варьируется от 6,65 мкм до 11,09 мкм, средний размер от 2,57 до 4,41 мкм. Минимальный размер пор для всех комбинаций находиться в пределах 2,09-2,88 мкм, что говорит о высокой степени гомогенности поровой структуры на микроуровне.

Таблица 1. **Характеристики поровой структуры исследуемых материалов**

Образец	Максимальная пора, мкм	Средняя пора, мкм	Минимальная пора, мкм	Фактическая толщина, мм	Коэффициент газопроницаемости, мкм^2
МВН - Грифтекс	8,31	4,40	2,52	1,6	1,809
Грифтекс - МВН	11,09	3,91	2,88	1,6	2,333
МВН - кН13	8,32	2,67	2,22	1,6	2,243
кН13 - МВН	8,31	3,16	2,54	1,6	2,194
Грифтекс - МВН - кН13	11,08	2,56	2,09	2,3	2,033
кН13 - МВН - Грифтекс	6,65	2,96	2,14	2,3	1,684

Выявлена прямая корреляция между характеристиками пористой структуры и коэффициентом газопроницаемости. Образцы с более высоким средним и максимальным размером пор, как правило, ожидаемо демонстрируют более высокий коэффициент газопроницаемости.

Стоит отметить, что на газопроницаемость влияет не только толщина ВПС, но и порядок расположения слоев. Лучше всего данный эффект заметен в ВПС, состоящих из трех составляющих. Так при одинаковой толщине трехслойные системы демонстрируют различные значения: проницаемость комбинации Грифтекс-МВН-кН13 (ВПМ «Грифтекс» расположен первым к потоку газа) составляет 2,033 мкм^2 и значительно выше, чем у кН13-МВН-Грифтекс – 1,684 мкм^2 (кН13 расположено первым к потоку газа). Это указывает на значительное влияние проницаемости каждого слоя и сопротивления на межслоевых границах.

Выводы

Проведенное исследование подтверждает, что выбор последовательности слоев в многослойных металл-полимерных волокнисто-пористых системах позволяет целенаправленно регулировать газопроницаемость при сохранении приемлемых значений других параметров пористой структуры. Полученные результаты служат основой для дальнейших исследований корреляции параметров пористой структуры с эффективностью фильтрации и разработки материалов с заданными свойствами.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ договор №Т25М-033 «Влияние параметров пористой структуры на фильтрующие характеристики многослойных волокнисто-пористых систем металл/полимер при фильтрации газожидкостных потоков».

1. Investigation of the Possibility of Application of Metal Fibrous Media in the Process of Filtration of Liquid Aerosols / Soleiman Bourrous, Dominique Thomas, Jean-Christophe Appert-Collin, Fabien Floc'Hlay, Mathieu Barrault // Atmosphere – 2022. – Vol. 13, – P. 1–17.
2. Шумская В. Ю. Повышение эффективности волокнисто-пористых многослойных полимерных фильтроматериалов для газотранспортного оборудования : дис. … канд. техн. наук : 05.16.09 / Гомель, 2023. – 166 л.

ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ТКАНЯХ РАСТЕНИЙ МЕТОДОМ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА

Д.Д. Булич[1], С.Н. Королько[1], А.О. Конаков[2], А.М. Мальтанова[2], А.А. Пешкова[3], С.К. Позняк[2], И.И. Зиньковская[3]

[1]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

[2]НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь

[3]Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Благодаря уникальному комплексу физико-химических свойств материалы на основе наночастиц серебра получили широкое распространение в медицине и различных отраслях промышленного производства. В процессе синтеза и применения наночастицы (НЧ) серебра неизбежно попадают в окружающую среду, что может иметь положительные и отрицательные последствия для растительных организмов в зависимости от доз и условий [1]. Недостаточность представлений о биологической роли НЧ серебра и об их участии в патогенезе заболеваний можно объяснить отсутствием чувствительных методов анализа концентраций металлов в биологических тканях и жидкостях. Так, пределы обнаружения микроэлементов, определяемых некоторыми современными методами – эмиссионной спектроскопией, люминесцентным анализом и полярографией, составляют 10^{-5} – 10^{-8} масс. %. Однако, концентрации многих микроэлементов в биологических тканях и жидкостях лежат ниже пределов чувствительности многих аналитических методов. Метод нейтронного-активационного анализа является привлекательной альтернативой благодаря высокой чувствительности (10^{-8} – 10^{-10} масс. %) и способности обнаруживать микроэлементы в форме наночастиц в сложных матрицах (в почве, в тканях растений и животных, в сложных композитных системах) [2].

Целью данного исследования являлось получение наночастиц серебра химическими методами с различными стабилизационными оболочками и оценка их накопления в растениях методом нейтронно-активационного анализа.

Коллоидные растворы НЧ серебра, стабилизированные поливинилпирролидоном (ПВП) (коллоид №1) и цитратом натрия (коллоид №2), были получены согласно следующим методикам. Коллоид №1: к 5 мл водного раствора $AgNO_3$ с концентрацией $1{,}18\cdot10^{-3}$ М приливали 37,5 мл водного раствора ПВП (масса навески - 0,045 г). Затем к полученной смеси при постоянном перемешивании на магнитной мешалке (1000 об./мин) сначала по каплям, а затем струйно добавляли 100 мл свежеприготовленного раствора $NaBH_4$ (концентрация $1{,}19\cdot10^{-4}$ М). Синтез проводили в течение 20 мин. Коллоид №2: 10 мл водного раствора $AgNO_3$ с концентрацией $1{,}18\cdot10^{-3}$ М нагревали до 95 °С при постоянном перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 1000 об./мин. Затем к нему по каплям приливали первую порцию (2 мл) водного раствора цитрата натрия с концентрацией $1{,}4\cdot10^{-3}$ М. Далее в полученную смесь вводили 0,8 мл свежеприготовленного раствора $NaBH_4$ (концентрация $1{,}19\cdot10^{-4}$ М). Спустя 5 мин. в реакционную смесь вводили вторую часть (5 мл, $1{,}4\cdot10^{-3}$ М) раствора цитрата натрия (общий объем введенного стабилизатора составил 7 мл); после чего оставляли полученную смесь перемешиваться 30 мин. Концентрация НЧ серебра в полученных коллоидах, определенная методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, составила 4,8 мг/л для коллоида №1 и 107 мг/л для коллоида №2.

Размеры полученных НЧ Ag исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа LEO. Для определения распределения частиц по размерам анализировали по три ПЭМ-микрофотографии для каждого образца; каждая микрофотография содержала не менее 30 частиц. Спектры оптического поглощения

коллоидов регистрировали с помощью спектрофотометра PerkinElmer Lambda 900.

Для оценки воздействия НЧ серебра на растения в качестве объекта исследования использовалась Mentha spicata L. Черенки корней Mentha spicata L. высаживали в горшки объемом 200 мл, заполненные почвой. НЧ серебра вносили в почву через две недели после появления всходов. Эксперимент длился 28 дней, после чего почву и корни растений высушивали при 50 °C в течение 72 ч, затем гомогенизировали и высушивали при 105 °C в течение 24 ч. Для определения содержания серебра в образцах почвы и корнях растений применяли инструментальный нейтронно-активационный анализ на установке «Регата» реактора ИБР-2 (Дубна, Россия).

Коллоид №1 представлен полидисперсными наночастицами сферической, эллипсоидальной и палочкообразной формы (рис. 1*а*). Средний размер сферических частиц составляет 12,8 нм. При этом в системе присутствует фракция мелких наночастиц (3,5 – 6 нм), а также крупные агломераты или отдельные частицы размерами от 20 до 50 нм. Коллоид №2 характеризуется более высокой монодисперсностью; он представлен сферическими наночастицами с общим диапазоном размеров от 10 до 35 нм и средним диаметром 23,5 нм. При этом основная фракция частиц сосредоточена в интервале от 18 до 25 нм. В спектрах оптического поглощения полученных коллоидов наблюдаются пики поверхностного плазмонного резонанса (ППР) при 413 и 405 нм для коллоида №1 и коллоида №2, соответственно.

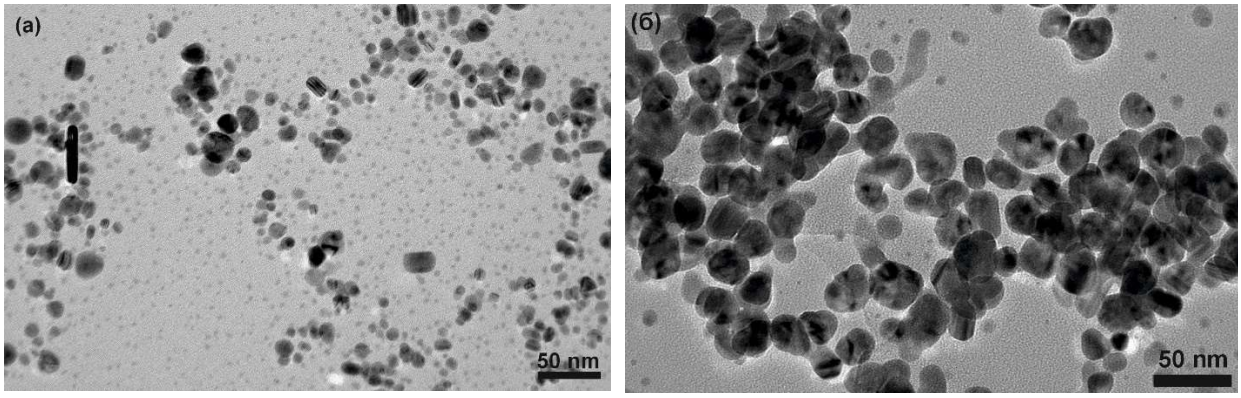


Рис. 1. **ПЭМ снимки наночастиц серебра стабилизированных ПВП (*а*) и цитратом натрия (*б*)**

Содержание серебра в образцах почвы, установленное методом нейтронно-активационного анализа, составляло 6,0 и 7,9 мг/кг для НЧ Ag коллоида №1 и НЧ Ag коллоида №2, соответственно. Однако его содержание в корнях Mentha spicata L. различается: 1,7 мг/кг для НЧ Ag, стабилизированных ПВП, и 6,5 мг/кг для НЧ Ag, стабилизированных цитратом натрия. В контрольных образцах серебро обнаружено не было.

Таким образом, НЧ Ag, стабилизированные цитратом натрия (коллоид №2), несмотря на больший размер НЧ, демонстрируют значительно более высокую биодоступность и проникающую способность по сравнению с наночастицами, стабилизованными ПВП (коллоид №1). Несмотря на близкое содержание серебра в почве для обоих вариантов, его накопление в корнях Mentha spicata L. при использовании цитратных НЧ Ag оказалось почти в 4 раза выше. Это указывает на то, что цитратная оболочка облегчает транспорт наночастиц в корневую систему растений и способствует их более интенсивному поглощению.

Работа выполнена в рамках Проблемно-тематической плана ОИЯИ № 03-4-1146-2022-2028 (по программе сотрудничества), НИР 2.1.3.03 ГПНИ «Химические процессы и

технологии» (2026−2030 гг.).

1. Stki N.A. and Ro M.I. Metal nanoparticles and plants. Characterization of metal nanoparticles // Ecological Chemistry and Engineering S. – 2013 (**20**), 9−22.
2. Фронтасьева М. В. Нейтронный активационный анализ на импульсном быстром реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. (**42**), № 2, 636–716.

КИНЕТИКА ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ТОНКИХ ПЛЁНОК ПАЛЛАДИЯ РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИИ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОРОДОМ

Б.Р. Буляков[1,2], И.В. Янилкин[1,2], А.В. Петров [1,2], Р.В. Юсупов [1,2], А.И. Гумаров [1,2], А.М. Рогов[1], Э.М. Ахметова [1,2], Ямщикова В.А. [1,2], Шарафетдинов Д.И. [1,2], Х.М. Салихов[2], Н.Д. Стоянов[4], Л.Р. Тагиров[2,3]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; bulyakov.bulat@yandex.ru

[2]Институт прикладных исследований АН РТ, Казань, Россия

[3]Казанский физико-технический институт ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

[4]ООО ЛЕД Микросенсор НТ, Санкт-Петербург, Россия

Цель

Исследовать кинетику изменения коэффициента оптического пропускания тонких плёнок палладия номинальной толщиной 10 нм с различной морфологией при их экспозиции в атмосфере, содержащей 4 об. % водорода в азоте, в температурном диапазоне от –30 до +50°C, а также оценить перспективность таких плёнок для применения в оптоэлектронных сенсорах H_2.

Материалы и методы

Плёнки Pd получены молекулярно-лучевым осаждением в сверхвысоком вакууме. Исследовались три образца: монокристаллическая эпитаксиальная плёнка на MgO(001) (S1), сплошная поликристаллическая плёнка на Al_2O_3(0001) (S2) и островковая плёнка на Al_2O_3(0001) (S3). Морфология поверхности контролировалась методом атомно-силовой микроскопии (Bruker Dimension FastScan). Кинетика пропускания измерялась на эллипсометре Woollam VASE (λ = 700 нм) в проточной термостабилизированной ячейке Linkam THMS600. Водород подавался в виде смеси 4 об. % H_2 в N_2 при нормальном давлении.

Результаты и их обсуждение

Исследовались структура и морфология полученных пленок, спектральный отклик их прозрачности на подачу водородсодержащей смеси в интервале длин волн 0.25-2.5 мкм, кинетика наводораживания и его релаксации при температурах в интервале -30 - +50°C. На кинетических кривых пропускания при напуске водородсодержащей смеси для всех плёнок выделяются две стадии: начальный почти линейный участок и последующий нелинейный (близкий к экспоненциальному) выход на насыщение, что подтверждается ранними работами [1, 2]. С понижением температуры наблюдается значительное замедление установления равновесия.

Для оценки скорости отклика использовалось время τ_{90}, за которо изменение пропускания достигает 90% от максимального значения. На рис. 1 приведены температурные зависимости τ_{90}. При температурах выше +40°C время отклика минимально

и составляет десятки секунд для всех образцов. При понижении температуры τ_{90} резко возрастает. Например, при –18°C для эпитаксиальной плёнки S1 время отклика примерно в 1.5 раза больше, чем для поликристаллической S2, и примерно в 5 раз больше, чем для островковой S3. Таким образом, островковая плёнка реагирует на водород быстрее всего, а эпитаксиальная — медленнее всего. Это согласуется с представлениями о том, что развитая поверхность и межзёренные границы ускоряют диффузию водорода в плёнку [3].

Температурная зависимость времени отклика для островковой плёнкиS3 близка к монотонной. Для поликристаллической S2 наблюдается немонотонность в интервале 5–20°C, для эпитаксиальной S1 — в интервале 15–35°C. Эти особенности коррелируют с температурными интервалами наиболее резкого изменения амплитуды оптического отклика, что связано с фазовым переходом палладия в смешанную металл-гидридную α+β-фазу [4].

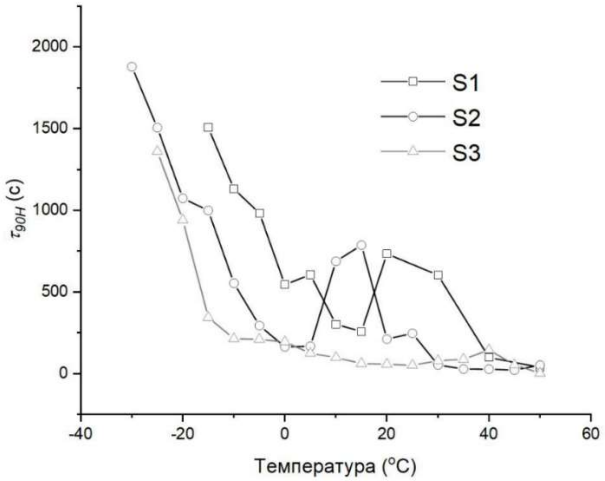


Рис. 1. **Температурные зависимости времени отклика τ_{90} образцов на водород (S1 — монокристаллическая, S2 — поликристаллическая и S3 — островковая пленки)**

Однако, островковая плёнка, обладая наибольшим быстродействием, уступает сплошным плёнкам по амплитуде относительного изменения пропускания. Максимальное значение $|\Delta T|/T0$ для неё составляет 15–16%, тогда как для поликристаллической — 20–23%, а для эпитаксиальной — до 27%. Выбор морфологии плёнки для сенсора водорода является компромиссом между скоростью отклика и его амплитудой.

Выводы

Кинетика оптического отклика тонких плёнок палладия на водород существенно зависит от морфологии и температуры. Островковая плёнка демонстрирует наибольшее быстродействие и более слабую температурную зависимость времени отклика, однако проигрывает сплошным плёнкам по величине относительного изменения пропускания. Монокристаллическая эпитаксиальная плёнка характеризуется наибольшим временем отклика, но и наибольшей амплитудой. Таким образом для оптоэлектронных сенсоров водорода выбор морфологии определяется конкретными требованиями: там, где критично быстродействие, предпочтительна островковая плёнка; там, где важнее чувствительность, — сплошные, особенно эпитаксиальные, плёнки.

1. Шутаев В.А., Гребенщикова Е.А., Матвеев В.А., Губанова Н.Н., Яковлев Ю.П. Кинетика изменения оптической прозрачности нанопленок палладия при взаимодействии с водородом // Оптика и спектроскопия. — 2023 (131), № 3, 419–423.
2. Hu Y., Lei J., Wang Z., Yang S., Luo X., Zhang G., Chen W., Gu H. Rapid response hydrogen sensor based on nanoporous Pd thin films // Int. J. Hydrogen Energy. — 2016 (41), № 25, 10986–10990.

3. RaviPrakash J., McDaniel A.H., Horn M., Pilione L., Sunal P., Messier R., McGrath R.T., Schweighardt F.K. Hydrogen sensors: Role of palladium thin film morphology // Sens. Actuators B: Chem. — 2007 (120), № 2, 439– 446.
4. Avila J.I., Matelon R.J., Trabol R., Favre M., Lederman D., Volkmann U.G., Cabrera A.L. Optical properties of Pd thin films exposed to hydrogen studied by transmittance and reflectance spectroscopy // J. Appl. Phys. — 2010 (107), 023504.

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ЕДИНИЧНЫХ ВОЛОКОН ИЗ СМЕСИ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА И ПОЛИПРОПИЛЕНА

В.Ю. Гарбарук

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

Введение

Динамика смачивания единичных волокон каплями жидкости является основой процессов, протекающих в слоях нетканых материалов фильтроэлементов-коалесцеров. Определение основных закономерностей и влияющих факторов является ключевой задачей при проектировании и создании все более эффективных фильтрационных решений

Цель

Исследование характеристик смачивания волокон из смесей полифенсульфида (ПФС) и полипропилена (ПП), полученных методом аэродинамического распыления расплава полимера (melt blowing, MB).

Материалы и методы

В работе использованы ПФС марки NHU-PPS (Zhejiang NHU Special Materials Co, Ltd) и ПП марки SIBEX PP R401 (СИБУР, РФ).На их основе методом MB были получены 6 групп образцов цилиндрических фильтрующих элементов с различным содержанием ПП, масс.%: 0; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15. Часть образцов подвергли дополнительной термической обработке при температуре 140 °C в течение 4 часов для увеличения степени кристалличности материала фильтроэлементов [1] .

Диаметр волокон полученных материалов составлял величину от 20 до 57 мкм. Из каждого образца были выделены волокна, соответствующим трем различным диапазонам диаметров. Волокна крепили горизонтально в металлической рамке с целью их выпрямления, свободная длина волокна в рамке – 40 мм. С помощью генератора аэрозоля TSI 9302 (TSI inc., США) выделенные волокна обрабатывали субмикронными каплями турбинного масла ТП-22С в течение 5 минут до момента образования капель симметричной бочкообразной формы на поверхности волокон [2,3]. Затем с помощью микроскопа MED D45T (Levenhuk Optics Ltd., США) с помощью программного обеспечения LevenhukLite и поверенного калибровочного слайда определяли угол смачивания и максимальную ширину капель (рис. 1).

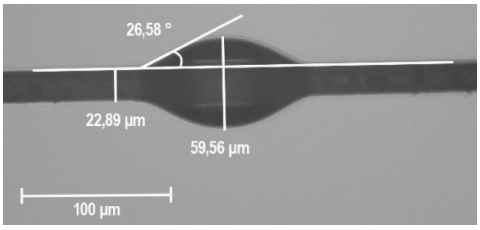


Рис. 1. **Параметры бочкообразной капли жидкости на единичном волокне и краевой угол смачивания**

Результаты и их обсуждение.

С увеличением диаметра волокон происходит увеличение ширины капель, которое в основном связано с увеличением площади поверхности волокна, при этом для групп с диаметрами волокон 29-36 мкм и 37-57 мкм медианное значение угла смачивания практически не изменилось (15,2°/14,1° и 14,7°/14,6° соответственно для материалов без/с термообработкой) и не зависит от содержания полипропилена в смеси. Для волокон 20-28 мкм медианное значение угла смачивания для образцов без термообработки составило 23,9°, для образцов с термообработкой 18,0° (табл. 1).

Таблица 1. **Медианные значения угла смачивания и ширины капель масла ТП-22С на смесевых волокнах ПФС и ПП разного диаметра**

Диаметр волокон, мкм	Угол смачивания, град		Ширина капли, мкм	
	Без термообработки	С термообработкой	Без термообработки	С термообработкой
20-28	23,9	18,0	*45,5*	45,3
29-36	15,2	14,1	*52,4*	53,8
37-57	14,7	14,6	71,0	71,2

При этом для нетермообработанных волокон на концентрационных зависимостях угла смачивания и ширины капли наблюдается локальный минимум в точке 5 % ПП (рис. 2).

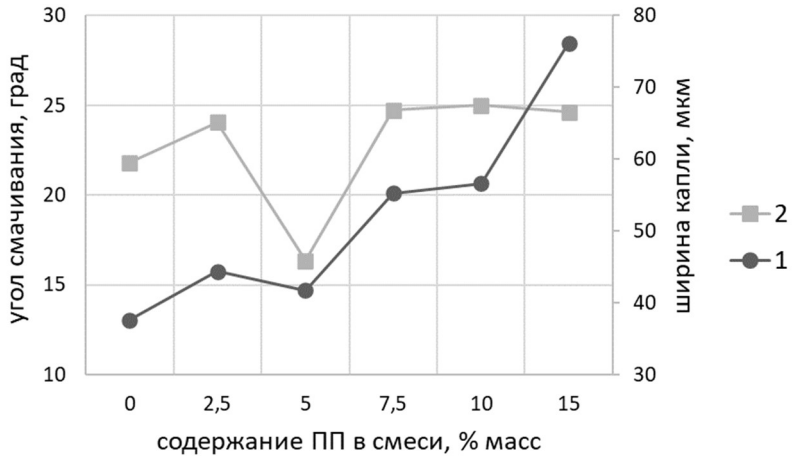


Рис. 2. **Зависимость угла смачивания (1) и ширины капли (2) от содержания полипропилена в составе волокон диаметром 20-28 мкм без термообработки**

Влияние содержания ПП в составе на эти величины можно связать с более низкой степенью кристалличностью ПФС, а также отличием в морфологии волокон меньшего диаметра, в частности взаимного расположения фаз ПФС и ПП и степени ориентации макромолекул.

Полученные данные могут быть взяты за основу при разработке новых фильтрующих систем, предназначенных для отделения жидкости, однако требуется дополнительные исследования влияния различного смесевого состава на эффективность коалесценции фильтрующего материала, представляющего собой запутанные и термоскрепленные волокна различного диаметра.

1. Гарбарук В.Ю. Влияние дополнительной обработки на эффективность очистки и физико-механические характеристики композиционных фильтрующих материалов на основе полифениленсульфида // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «ПОЛИКОМТРИБ-2025» — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2025. — 64.

2. Chou T.-H., Hong S.-J., Liang Y.-E., Tsao H.-K., Sheng Y.-J. Equilibrium phase diagram of drop-on-fiber: coexistent states and gravity effect // Langmuir — 2011 (**27**) 3685—3692.
3. Amrei M.M., Davoudi M., Chase G.G., Vahedi Tafreshi H. Effects of roughness on droplet apparent contact angles on a fiber // Separation and Purification Technology — 2017 (**180**), 107—113.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАВЕДЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В НАНОКОМПОЗИТЕ С КРАСИТЕЛЕМ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Доста

Гродненский Государственный Университет Имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; vikadosta0@gmail.com.

Цель

Численное моделирование наведенного поглощения в нанопористом стекле с полимером и красителем фталоцианином цинка при различных длительностях воздействующего излучения высокой интенсивности методом скоростных уравнений.

Теоретическое описание

Нанопористое стекло с полимером и красителем (НПСП) является одним из перспективных материалов, оптические свойства которого могут модулироваться излучением короткой длительности. Изменение оптических свойств НПСП под действием излучения связано с процессом наведенного поглощения [1-3]. Так как на практике используются импульсы излучения как наносекундной, так и пикосекундной длительности, имеет смысл исследовать изменение наведенного поглощения в зависимости от длительности.

Исследовать процесс наведенного поглощения при различной длительности импульсов воздействующего излучения возможно исходя из упрощённой схемы энергетических уровней красителя [2,4].

Система кинетических уровней молекул красителя позволяет описать процесс наведенного поглощения излучения в каналах синглетных и триплетных уровней энергии, учесть спонтанные, безызлучательные и интеркомбинационные переходы.

$$\frac{d}{dt}n_{S0}(t) = -P(t)\cdot\sigma_{S0}\cdot n_{S0}(t) + k_{S0}\cdot(1-n_{S0}(t)-n_{S2}(t)-n_{T1}(t)-n_{T2}(t)) + k_{TS}\cdot n_{T1}(t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}n_{S2}(t) = P(t)\cdot\sigma_{S}\cdot(1-n_{S0}(t)-n_{S2}(t)-n_{T1}(t)-n_{T2}(t)) - k_{S}\cdot n_{S2}(t) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}n_{T1}(t) = -P(t)\cdot\sigma_{T}\cdot n_{T1}(t) - k_{TS}\cdot n_{T1}(t) + k_{T}\cdot n_{T2}(t) + k_{ST}\cdot(1-n_{S0}(t)-n_{S2}(t)-n_{T1}(t)-n_{T2}(t)) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}n_{T2}(t) = P(t)\cdot\sigma_{T}\cdot n_{T1}(t) - k_{T}\cdot n_{T2}(t) \quad (4)$$

$$N = n_{S0} + n_{S1} + n_{S2} + n_{T1} + n_{T2}\ , \quad (5)$$

где $P(t)$ – плотность фотонов пучка накачки, N – концентрация частиц в образце, n_{Si} – населённость соответствующих возбужденных синглетных состояниях, n_{Ti} – населённость соответствующих возбужденных триплетных состояниях, σ_i – сечение перехода. Коэффициенты k_{ij} отвечают за безызлучательную релаксацию состояния i на переходе $i - j$.

Численное моделирование и результаты

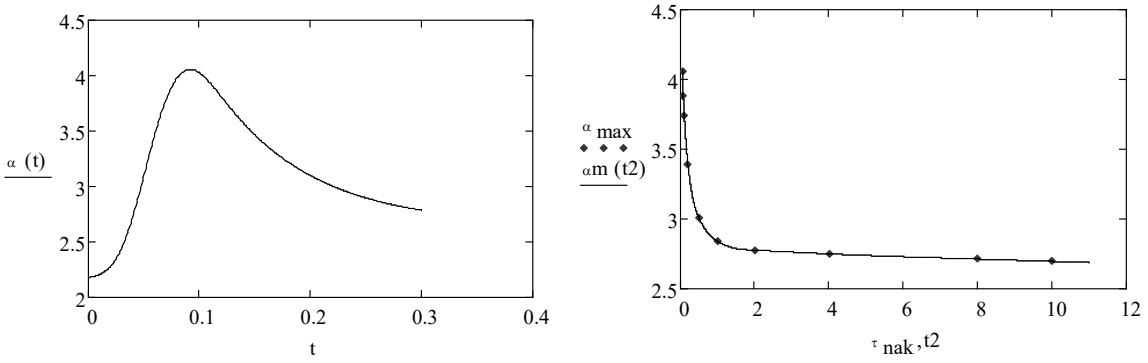
При моделировании воздействия мощного излучения на образец с красителем, использовались параметры красителя фталоцианин цинка: $N = 4{,}22 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$, $\sigma_{S0} = 5{,}165 \cdot 10^{-18}$ см^2 , $\sigma_S = 1{,}55 \cdot 10^{-17}$ см^2, $k_{S0} = 10$ нс$^{-1}$, $k_S = 10^3$ нс$^{-1}$, $k_{ST} = 2$ нс$^{-1}$, $k_{S1} = 10^3$ нс$^{-1}$, $k_T = 10^3$ нс$^{-1}$, $\sigma_T = \sigma_S$, $k_{TS} = 0.01\ k_{ST}$ [4,5].

В результате выполненного численного моделирования были найдены зависимости населённостей синглетных и триплетных энергетических состояний от времени. Получив значения населённостей при соответствующей интенсивности возбуждающего излучения был определен коэффициент поглощения

$$\alpha(t) = \sigma_{S0} \cdot n_{S0}(t) + \sigma_S \cdot n_{S1}(t) + \sigma_T \cdot n_{T1}(t) \qquad (6)$$

Исходя из полученных данных было вычислено изменение коэффициента поглощения излучения при различных длительностях излучения: от 50 пс до 12 нс, рис. 1 а).

Энергия возбуждающих импульсов при этом поддерживалась постоянной. Коэффициент поглощения значительно изменяется с течением времени. Пока действует возбуждающее излучение он значительно увеличивается, до максимального значения, а далее релаксирует до некоторого значения, оставаясь на уровне выше исходного.



а) б)

Рис. 1. **а) Зависимость коэффициента поглощения от времени (нс) при длительности импульса возбуждения τ_{nak}= 0.05 нс. б) Зависимость максимума коэффициента поглощения от длительности импульсов возбуждения (нс)**

Указанная особенность характерна для коэффициента поглощения вне зависимости от длительности возбуждения.

Максимум коэффициента поглощения с увеличением длительности импульсов воздействующего излучения уменьшается в диапазоне длительностей от 50 пс до 1 нс достаточно резко, а начиная с 2 нс и далее – достаточно слабо, рис. 1 б).

Таким образом, приведённые зависимости позволяют сделать вывод, что величина максимума коэффициента поглощения, до которого увеличивается $\alpha(t)$, достигается сразу после окончания действия импульсов возбуждения. Увеличение длительности возбуждающих импульсов от 50 пс до 1,5 нс приводит к сильному уменьшению максимума коэффициента поглощения, в то время как увеличение длительности импульсов возбуждения с 2 нс до 10 нс и более способствует незначительному уменьшению максимума $\alpha(t)$.

1. Долотов, С. М. Нелинейное поглощение лазерного излучения фталоцианинами цинка и свинца и порфирином цинка, находящимися в композитной матрице нанопористое стекло – полимер / С. М. Долотов [и др.] // Квантовая электроника. – 2012. Т. 42. – №. 1, – С. 39-43.
2. Колдунов, М. Ф. Показатели качества наведенного поглощения оптического излучения в

органических соединениях / М. Ф. Колдунов, Л. М. Колдунов // Прикладная физика, – 2015. №5, – С. 5-11.
3. Курстак, В. Ю. Наведенное поглощение в композите «нанопористое стекло – полимер» с красителем при пикосекундном возбуждении / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2025. – Т. 15. – № 1. – С. 105-113.
4. Курстак, В. Ю. Определение нелинейных составляющих показателя преломления композита PcPb при пикосекундном возбуждении / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, Л. М. Колдунов // Квантовая электроника : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2023 г. / БГУ ; редкол.: М. М. Кугейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Минск, 2023. – С. 79–83. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
5. Курстак, В. Ю. Модель наведенного поглощения излучения пикосекундной длительности в нанокомпозите с красителем с учетом двухфотонного поглощения / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2026. – Т. 16. – № 1. – С. 60-69.

ЦИФРОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ ДЕТАЛИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Э.Р. Жданов[1], А.В. Олейник[2], И.И. Конищук[1]

[1]ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА», Москва, Россия; blackonchanel@gmail.com

[2]Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКТИ РАН), Москва, Россия

Цель и предмет цифровой аттестации

Цифровая аттестация решает прикладные инженерные задачи. Виртуальная модель должна гарантировать работоспособность физического изделия. Для этого мы проверяем происхождение расчетных параметров, анализируем сходимость КЭ-сетки и сопоставляем результаты с экспериментом. Все эти данные собирает цифровой двойник [1].

Структура слоистых ПКМ определяет их свойства. Поведение монослоя зависит от волокон и смолы, но свойства готового ламината дополнительно искажаются выкладкой, пористостью и кривизной. Справочные константы искажают результат. Если берем свойства из таблиц без учета реальных дефектов, погрешность расчетов растет. Чтобы исключить эту неточность, мы разработали схему сквозной аттестации и проверили ее на пластине при изгибе, растяжении и кручении.

Уровни процедуры и граф доказательств

Алгоритм построен на двух уровнях. Автоматический нижний контур сверяет единицы измерений, контролирует хеш-суммы геометрии и генерирует файлы обмена. Экспертный верхний контур отвечает за физику. Программа сравнивает расчетные тензоры с сигналами датчиков, подсвечивая инженеру проблемные зоны КЭ-сетки. Окончательное решение принимает человек. Алгоритм лишь готовит сжатую аналитику, а право подписи остается за расчетчиком.

Доказательная база формируется графом зависимостей без циклов. В его узлах записаны CAD-модель, паспорта сырья, итерации сетки, протоколы стенда и эцп. Дуги фиксируют порядок этапов. Вычислительный блок ведет от геометрии к полям напряжений. Экспериментальный блок привязывает к ним калибровки пресса, точки датчиков и фотоснимки трещин [2].

Апробация методики и анализ результатов

Алгоритм проверен на пластине 215×100×10 мм. Выкладка - кремнеземная ткань с фталонитрильной матрицей, укладка [0°/90°]. Расчет выполнялся в ANSYS 2026 R1 (Static Structural). Трехточечный изгиб опирался на цилиндры. Кручение задавалось поворотом захватов шириной 10 мм с моментом. Растяжение моделировали смещением торца. Сетка строилась методами Quad Dominant и Sweep с элементом 2 мм.

Схемы нагружения дали принципиально разный отклик. При изгибе пиковое напряжение составило 3,8854 МПа (прогиб 1,5261 мм, реакция 1,6916 Н, обратный запас 0,63864). Растяжение показало 9,4137 МПа (смещение 0,20551 мм, сила 902,35 Н, запас 1,4969). Кручение оказалось самым тяжелым. Напряжение выросло до 37,724 МПа при смещении 23,852 мм и моменте 1060,2 Н·мм (обратный коэффициент 6,6133). Такие деформации требуют учета геометрической нелинейности и проверки по Hashin [3]. Поэтому кручение выбрали приоритетным тестом для стенда.

Аттестационный статус и выводы

Оценку надежности мы строим по пятиступенчатой вертикали: от первичной геометрии до разрывных испытаний образцов на сертифицированном стенде. Статус детали - «расчетный прототип». Это запрещает приемку. Пока не доказана сеточная независимость и не получены экспериментальные диаграммы, использовать численные значения для конструкторских решений нельзя.

Предложенный подход систематизирует цифровой аудит. Дальнейшие шаги - замер упругих констант монослоя, густые КЭ-сетки и учет накопительного разрушения. Поля перемещений мы сверим с оптической системой. После этого двойник получит официальное подтверждение применимости.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант №24-19-00328).

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2021.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2019.
3. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites // Journal of Applied Mechanics. 1980. Vol. 47. No. 2. P. 329-334.

ЦИФРОВОЙ ПАСПОРТ ДЕТАЛИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЕЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Э.Р. Жданов[1], Л.М. Червяков[2], В.М. Гранкин[1]

[1]ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА», Москва, Россия blackonchanel@gmail.com

[2]Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКТИ РАН), Москва, Россия

Постановка задачи

Цифровой паспорт композитной детали решает задачу полной прослеживаемости изделия. В нем аккумулируются версионные данные о сырье, геометрии, технологических режимах автоклавного формования, расчетных моделях и результатах физических тестов. Информационную основу этой базы формирует цифровой двойник [1]. В отличие от традиционного бумажного паспорта, электронная запись не просто констатирует факт годности, а хранит полный контекст: условия замеров, калибровку датчиков, погрешности и историю правок. Для слоистого пластика это принципиально. Механический отклик

композита жестко зависит от ориентации волокон, пористости смолы, температурного градиента отверждения и реальных допусков толщины.

Цель исследования - создать практическую структуру цифрового паспорта детали из ПКМ. В работе мы выделили обязательные информационные разделы, формализовали правила версионирования КЭ-моделей и выстроили шкалу зрелости расчетных данных. Верификацию структуры провели на трех расчетных тестах. В них вошли поперечный изгиб, кручение и осевое растяжение пластины.

Формирование паспортной записи

Паспорт структурирован по модульному принципу. В нем выделено семь ключевых разделов. Идентификационный модуль содержит шифр изделия, организацию и ревизию файла. Материаловедческая часть описывает тип полимерной матрицы, параметры волокон, толщину слоев и термобарический режим отверждения. Расчетный блок целиком отдан под КЭ-моделирование: здесь зафиксированы CAD-геометрия, тип сетки, контактные пары, нагрузки и контрольные критерии разрушения. Экспериментальный раздел аккумулирует диаграммы деформирования, фотоснимки трещин и метрологические погрешности приборов. Завершает паспорт экспертное заключение с четкими границами инженерного применения данных.

Наполнение паспорта идет по строгому маршруту. При первичной регистрации детали присваивается цифровой идентификатор (UID). Далее инженер привязывает к карточке версию CAD-геометрии, технологический паспорт связующего, КЭ-сетки и расчетные кейсы. Каждая цифра снабжается ссылкой на метод измерений или номер протокола. Как только автоматический аудит подтверждает полноту полей и корректность размерностей, модель отправляется на численную верификацию и сверку с натурным экспериментом. Любое изменение - от смены партии препрега до корректировки КЭ-сетки - порождает новую ревизию паспорта с фиксацией всей предыстории.

Расчетная апробация

Апробацию паспорта мы выполнили на плоском образце размером 215×100×10 мм из кремнеземной нити с фталонитрильным связующим при послойной укладке под углом 90°. Вычисления велись в ANSYS 2026 R1 (модуль Static Structural). Постановку задачи изгиба мы синхронизировали с требованиями профильного ГОСТа [2]. В расчетной схеме кручения концевые захваты длиной 10 мм моделировались жесткими недеформируемыми областями с приложением момента. Растяжение задавалось кинематическим смещением торца вдоль длинной оси. Шаг сетки составлял 2 мм (методы Quad Dominant и Sweep).

Результаты расчетов внесены в соответствующие блоки паспорта. В тесте на изгиб зафиксированы максимальное напряжение 3,8854 МПа, прогиб 1,5261 мм и реакция опор 1,6916 Н (обратный коэффициент запаса 0,63864). Растяжение привело к напряжению 9,4137 МПа, деформации 0,20551 мм и осевому усилию 902,35 Н (обратный коэффициент 1,4969). Наиболее жестким оказался расчет на кручение. В нем эквивалентное напряжение достигло 37,724 МПа, перемещение составило 23,852 мм, а реактивный момент - 1060,2 Н·мм, что дало обратный коэффициент запаса 6,6133. Все эти значения внесены в паспорт как первичные расчетные индикаторы. До внедрения послойных критериев прочности они не подменяют итогового экспертного заключения.

Статус результатов и выводы

Созданный документ получил статус «расчетный прототип». Структура паспорта связывает целевые показатели прочности с CAD-геометрией, параметрами сетки, краевыми условиями и исходными файлами решателя. Текущая ревизия дает возможность сопоставлять напряженно-деформированное состояние пластины и готовить план лабораторных испытаний. Единая версионная среда исключает рассинхронизацию между

расчетчиками и технологами, что отвечает концепции жизненного цикла цифрового двойника [3].

Предложенная архитектура паспорта превращает разнородные инженерные данные в целостный цифровой актив. Дальнейшие шаги очевидны. Модель требует численной проверки на сходимость сетки, точных экспериментальных модулей упругости монослоя и подключения математических критериев послойного накопления повреждений. После сопоставления расчетов с тензометрией и ультразвуковым контролем паспорт получит статус валидированного документа для конструкторского применения.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 24-19-00328).

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2021.
2. ГОСТ Р 56810-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов. М.: Стандартинформ, 2016.
3. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15. No. 4. P. 2405-2415.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ

В.В. Жолнерчик, В.А. Бирюк

Университет гражданской защиты, Минск, Беларусь; prb@ucp.by

Актуальность

Промышленные пыли представляют собой дисперсные материалы, функциональные свойства которых определяются совокупностью физико-химических и структурных характеристик. Размер и форма частиц, дисперсность, влажность, химический состав и концентрация оказывают существенное влияние на процессы тепло- и массообмена, воспламенения и распространения горения. При диспергировании в воздушной среде данные свойства определяют способность материала образовывать взрывоопасные пылевоздушные смеси [1]. В связи с этим исследование закономерностей влияния характеристик материала на параметры воспламеняемости и взрываемости является актуальной задачей, объединяющей экспериментальные методы исследования и моделирование свойств дисперсных систем.

Цель исследования

Целью является анализ современных методов исследования пожаровзрывоопасных свойств промышленных пылей и подходов к установлению зависимостей между характеристиками дисперсного материала и параметрами его воспламенения и взрыва.

Материалы и методы

Исследование функциональных свойств промышленных пылей предусматривает комплексное определение характеристик материала и параметров его взаимодействия с окислительной средой. К основным показателям относятся нижний концентрационный предел распространения пламени, максимальное давление взрыва (P_{max}), максимальная скорость нарастания давления ($(dP/dt)_{max}$), индекс взрывоопасности (K_{St}), минимальная энергия зажигания и температура самовоспламенения [2–4].

Одним из основных экспериментальных методов является определение (P_{max}) и ($(dP/dt)_{max}$) в замкнутых реакционных сосудах при различной концентрации исследуемого

материала. Полученные экспериментальные зависимости позволяют установить условия наиболее интенсивного развития процесса и определить индекс (K_{St}), используемый для сравнительной характеристики интенсивности дефлаграции пылей [2, 3]. Для исследования чувствительности материала к внешнему энергетическому воздействию определяют минимальную энергию зажигания, а также температуру самовоспламенения облака и слоя пыли. Для оценки воспламеняемости применяются специализированные установки. *Модифицированная трубка Гартмана* используется для предварительной проверки способности пыли образовывать воспламеняющееся облако при воздействии искры или нагретой спирали. *20-литровая сфера* представляет собой взрывоустойчивую герметичную камеру, в которой формируется пылевое облако и исследуется его воспламенение. *Печь Годберта–Гринвальда* обеспечивает контакт диспергированной пыли с нагретой зоной и применяется для определения температуры самовоспламенения облака. *Печь BAM* предназначена для аналогичного определения температуры самовоспламенения при прохождении пыли через нагретую камеру [4].

Важным этапом является исследование дисперсных и физико-химических характеристик материала. Уменьшение размера частиц увеличивает удельную поверхность взаимодействия с окислителем, вследствие чего изменяются условия теплообмена и кинетика протекания процессов горения. На исследуемые параметры также влияют влажность, концентрация, содержание кислорода и наличие инертных компонентов [5]. Поэтому комплексный подход предполагает сопоставление результатов гранулометрического и физико-химического анализа с параметрами воспламеняемости и взрываемости.

Результаты и обсуждение. Современные методы исследования позволяют рассматривать пожаровзрывоопасные характеристики не только как отдельные нормативные показатели, но и как функциональные свойства материала, изменяющиеся в зависимости от его состояния и условий взаимодействия со средой. Параметры P_{max}, $(dP/dt)_{max}$) и (K_{St}) могут использоваться для количественной оценки интенсивности процесса, а минимальная энергия зажигания и температура самовоспламенения – для оценки чувствительности материала к энергетическому и тепловому воздействию [2, 4].

Перспективным направлением является математическое моделирование указанных характеристик на основе экспериментальных данных. Анализ зависимостей между дисперсностью, концентрацией, физико-химическими свойствами материала и параметрами взрыва позволяет формировать расчетные модели и прогнозировать изменение функциональных свойств пылевоздушных систем при варьировании исходных параметров [5, 7]. Современные исследования также направлены на повышение точности оценки параметров взрыва путем учета условий взвихряемости материала и применения статистических методов обработки данных [6].

Таким образом, исследование промышленных пылей требует комплексного сочетания экспериментальных методов и методов математического моделирования. Установление количественных зависимостей между характеристиками дисперсного материала и параметрами его воспламеняемости и взрываемости позволяет расширить возможности прогнозирования опасных свойств и сформировать основу для разработки моделей поведения пылевоздушных систем [5–8].

1. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли / А. Я. Корольченко. – М. : Химия, 1986. – 212 с.
2. ГОСТ 12.1.044-2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М. : Стандартинформ, 2018.
3. ASTM E1226-19(2025). Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds. – West Conshohocken : ASTM International, 2025.

4. ГОСТ 31610.20-2-2017. Взрывоопасные среды. Часть 20-2. Характеристики материалов. Методы испытаний горючей пыли. – М. : Стандартинформ, 2018.
5. Zhang, J. Factors influencing and a statistical method for describing dust explosion parameters: a review / J. Zhang, P. Xu, L. Sun [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – Vol. 56. – P. 386–401. – DOI: 10.1016/j.jlp.2018.09.005.
6. Кириллова, П. А. Исследование параметров взвихряемости пыли для оценки избыточного давления взрыва : выпускная квалификационная работа магистра / П. А. Кириллова. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026.
7. Eckhoff, R. K. Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards / R. K. Eckhoff. – 3rd ed. – Oxford : Gulf Professional Publishing, 2003. – 720 p.
8. Полетаев, Н. Л. Взрывоопасность пылей : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.26.03 / Н. Л. Полетаев. – М. : ВНИИПО, 1998. – 265 с.

КОМПОЗИТНЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИПИРРОЛА И КАОЛИНА

А.Г. Лабецкий, Е.Г. Петрова, А.А. Рогачев

Институт химии новых материалов НАН РБ; labetskeyandrey@gmail.com

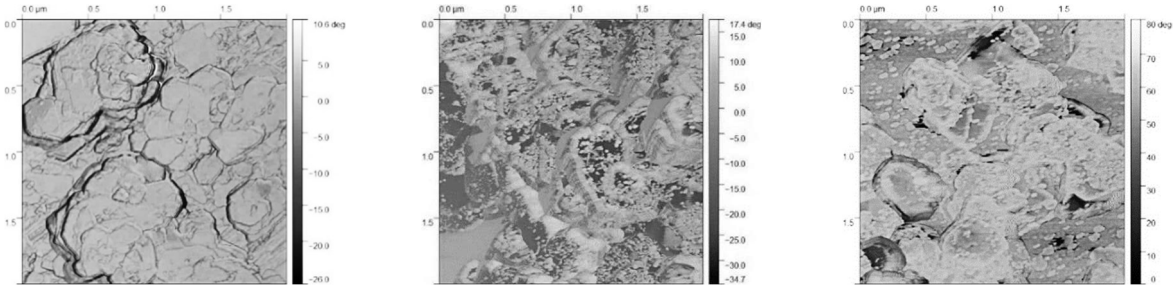
Работа посвящена исследованию механизма образования газочувствительного композита полипиррол-каолин и сенсорным свойствам получаемого материала. Полипиррол в составе композита обеспечивает чувствительность материала к аммиаку, обусловленную обратимым снижением электропроводности при взаимодействии с NH_3. Каолиновая подложка, выступающая в роли носителя, увеличивает эффективную площадь поверхности и адсорбцию аналита. Для повышения адгезионных свойств каолина по отношению к полипирролу дополнительно проводилась его активация и функционализация путем обработки раствором «пиранья» [1].

Материалы и методы

Газочувствительные покрытия синтезировали на встречно-штыревых графитовых электродах методом VPP (vapor phase polymerization). Навеску окислителя ($FeCl_3$) вносили в ультразвуковую суспензию каолина марки AKF-78, обработанного «пираньей», в ацетоне, с массовой долей носителя 6, 8, 10% так, чтобы концентрация окислителя составила 0,1 М. Смесь наносили на электрод, высушивали и помещали в реактор с насыщенными парами пиррола при комнатной температуре и атмосферном давлении (время экспозиции – 2-10 мин). Сенсорный отклик к парам аммиака в диапазоне концентраций 60-5900 ppm исследовали в экспозиционной камере с помощью измерителя иммитанса Е7-20 (МНИПИ, Беларусь). Исследование морфологии поверхности образцов проводили методом атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе MultiMode III (Veeco, USA) в полуконтактном режиме с использованием прибора Tescan Vega II XMU с системой микроанализа INCA Energy. Первичная обработка АСМ-изображений выполнялась в программном обеспечении Gwyddion.

Результаты и обсуждение

Каолин представляет из себя алюмосиликат сложной слоистой формы (рис. 1). Обработка пираньей вызывает появление функциональных групп на поверхности минерала, из-за чего рост полипиррола становится конформным. Образование фазыполипиррола начинается преимущественно на границах пластинок.

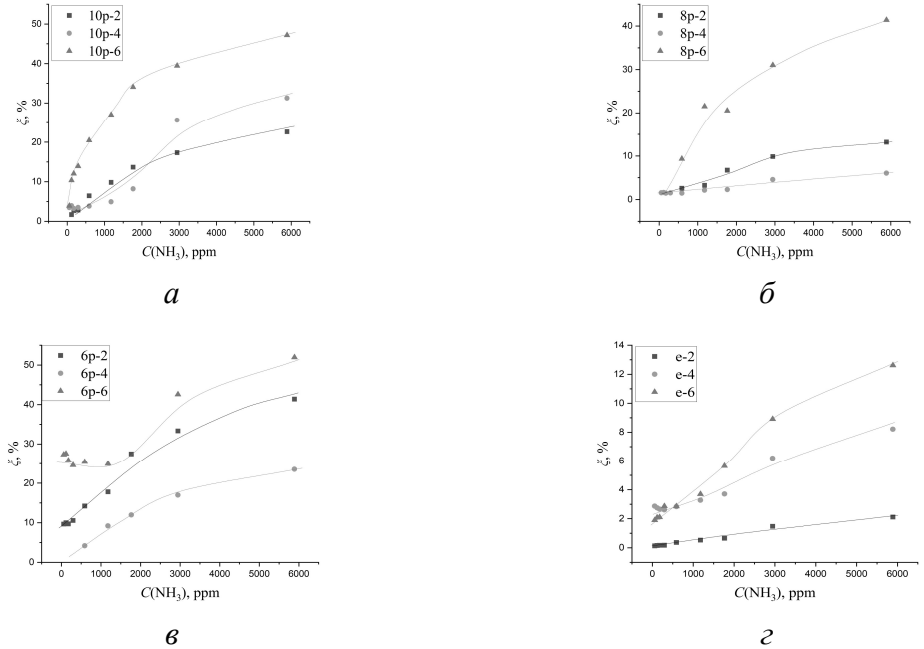


а *б* *в*

Рис. 1. **АСМ изображения в фазовом режиме для полипиррола на частицах каолина (10%-я суспензия) с разным временем полимеризации: *а* – 0 мин (чистый каолин); б – 2 мин; *в* – 10 мин**

На основной поверхности образуются только единичные зародыши с размерами ~20-40 нм (рис. 1, б). С увеличением времени экспозиции в парах пиррола вся поверхность пластин покрывается сплошным тонким слоем полимера, на котором в последствии происходит рост вторичных зародышей (рис. 1, в). При этом покрытие даже спустя 12 ч полимеризации является конформным, т.е. полностью повторяет рельеф подложки и очертания отдельных пластин каолина независимо от условий синтеза.

На рисунке 2 представлены концентрационные зависимости сенсорного отклика на аммиак для образцов с разными временами полимеризации и содержанием каолина. Номенклатура образцов: XY-Z, где X – массовая доля каолина во взвеси, e - для образцов на основе чистого полипиррола (для сравнения); Y = p для образцов, содержащих каолин, обработанный пираньей; Z - время полимеризации.



а *б* *в* *г*

Рис. 2**. Сравнение сенсорных свойств образцов на основе взвесей каолина различного состава**

Как видно из рис. 2, образцы. содержащие каолин, демонстрируют больший отклик, чем сенсоры на основе чистого полипиррола. Максимальная чувствительность характерна для образцов с временем полимеризации 6 минут. В серии образцов состава 10p (рис. 2, а) наблюдается рост максимального отклика пропорционально времени полимеризации.

Образец 10р-6 демонстрирует высокие отклики, а также начинается с нуля, что говорит о высокой чувствительности в выбранном диапазоне концентраций.

Выводы

Рост полипиррольной фазы является конформным по отношению к подложке в рассмотренном диапазоне времен нахождения в насыщенных парах пиррола. В сравнении с сенсорами, не содержащими носитель, каолин-содержащие сенсоры демонстрируют больший относительный отклик. Наиболее перспективным для изучения является образец на основе 10% суспензии каолина со временем экспозиции в реакторе с насыщенными парами пиррола 6 минут.

1. Sidorenko A. Yu. et al. Preparation, acid modification and catalytic activity of kaolinite nanotubes in α-pinene oxide isomerization // RSC Adv. 2024. V. 14. № 34. P. 25079–25092.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СТАЛИ 40Х ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЗАКАЛКИ

А.А. Максимюк, Н.В. Бибик

Национальный Детский Технопарк, Минск, Беларусь; a77423463@gmail.com

Цель

Повышение долговечности и износостойкости деталей различного оборудования и машин напрямую зависит от правильно подобранных технологий упрочнения, в частности - термической обработки. В условиях интенсивных механических нагрузок, абразивного износа и циклических напряжений детали машин подвергаются ускоренному разрушению, что приводит к преждевременному выходу оборудования из строя и существенным экономическим потерям на производстве [1-2]. Наиболее эффективным способом упрочнения остается термическая обработка, в частности закалка. Правильный выбор охлаждающей среды при закалке является ключевым фактором, определяющим баланс между высокой твердостью и исключением образования трещин.

Целью данной работы является применением инструментальных методов для установления влияния различных охлаждающих сред (воды, масла и воздуха) на микроструктуру, фазовый состав и микротвердость конструкционной стали 40Х.

Методы и материалы

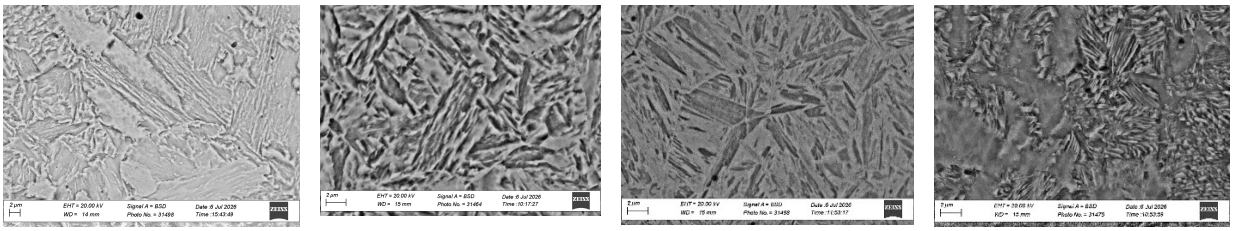
Исследование проводилось на образцах легированной конструкционной стали 40Х, изготовленных в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 4 мм. Процесс термической обработки включал нагрев образцов до 860 °С в течение 15 минут. Для изучения влияния скорости отвода тепла на структурообразование использовались три среды охлаждения: воздух при комнатной температуре, предварительно подогретое до 50°С масло, а также 10% водный раствор хлорида натрия комнатной температуры. Микроструктуру изучали методами оптической и растровой электронной микроскопии. Фазовый состав закаленных образцов стали изучался рентгеноструктурным анализом на дифрактометре Rigaku Ultima IV в CuKα излучении. Измерение твердости исследуемых образцов выполнялось по методу Виккерса при нагрузке 100 г.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1а представлена микрофотография поверхности шлифа исследуемого образца стали 40х до проведения закалки. На изображении наблюдается феррито-перлитная смесь

с преобладанием перлитной составляющей. Основную площадь микрофотографии занимает перлит, имеющий выраженное слоистое (пластинчатое) строение. Межпластинчатое расстояние варьируется от 0,5 до 2 мкм.

Для оценки влияния максимальной скорости охлаждения на характер фазовых превращений и морфологию структуры стали 40Х был исследован образец, прошедший термическую обработку с закалкой в воде. Анализ структуры выполнялся методом растровой электронной микроскопии при увеличении позволил выявить, что основной структурной составляющей образца, закаленного в водном растворе NaCl, является мартенсит с четким игольчатым рельефом (рис. 1б). На РЭМ-изображении образца, закаленного в масле (рис. 1в), также наблюдается игольчатый рельеф мартенсита. По сравнению с образцом после водной закалки, иглы выглядят менее острыми, что указывает на меньшую степень тетрагональности решетки. Охлаждение образцов стали на воздухе не обеспечивает мартенситное превращение из-за недостаточной скорости охлаждения формируется мелкодисперсная ферритно-перлитная структура.



а б в г

Рис. 1. **Микроструктура стали 40Х: исходное состояние (а), после закалки в воде (б), масле (в), на воздухе(г)**

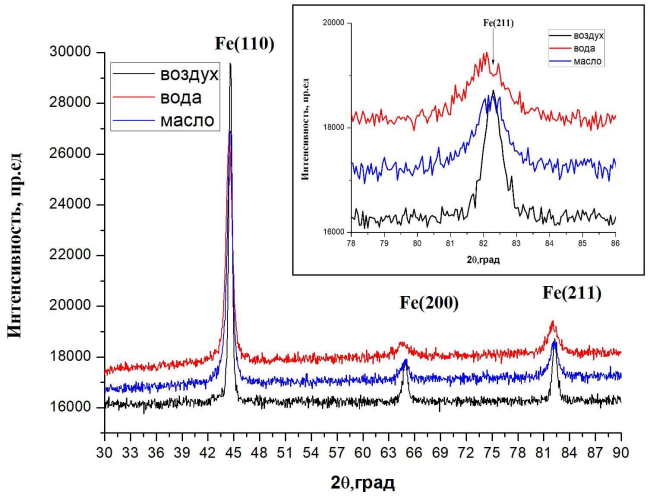


Рис. 2. **Дифрактограмма образцов стали 40Х после закалки в различных средах**

Для выявления искажений кристаллической решетки, возникающих при мартенситном превращении, выполнен рентгеноструктурный анализ закаленных образцов стали 40Х. По положению дифракционных максимумов рассчитан параметр кристаллической решетки для всех исследуемых образцов. Установлено, что параметр решетки закономерно возрастает с увеличением скорости охлаждения: от 0,2868 нм (воздух) до 0,2876 нм (вода). Это свидетельствует о фиксации углерода в твердом растворе при бездиффузионном мартенситном превращении. Для образца, закаленного в воде, на дифрактограмме наблюдается расщепление на компоненты дублета, на что является прямым экспериментальным доказательством тетрагональности решетки мартенсита. Смещение, уширение и асимметрия дифракционных пиков служат количественными критериями

оценки уровня внутренних напряжений.

Измерения по методу Виккерса подтвердили прямую корреляцию между скоростью охлаждения и твердостью стали. Наименьшее значение зафиксировано после охлаждения на воздухе – 189,14 HV. Закалка в масле обеспечила твердость 511,85 HV, а после низкого отпуска (190 °С, 30 мин) – 475,24 HV. Максимальная твердость достигнута при закалке в воде – 552,58 HV. Таким образом, установлена количественная связь между режимом термической обработки, параметрами кристаллической решетки и уровнем твердости стали 40Х.

1. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – 6-е изд. – Мск.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Гольдштейн, Я. Е., Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. - М.: Металлургия, 1986. - 272 с.
3. Сталь. Эталоны микроструктуры: ГОСТ 8233-56; введ. 01.07.1957. – Мск.: ИПК Издательство стандартов, 1957 - 16 с.

ПРИМЕНЕНИЕ (ВОЗМОЖНОСТИ) ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ

А.П. Сазанков, Е.Г. Орешкевич

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

Введение

Оценка трещиностойкости полимерных материалов при циклическом нагружении является критически важным этапом прогнозирования ресурса и надежности изделий. Согласно стандарту ГОСТ 34256 [1], для определения скорости роста усталостной трещины необходимо прецизионное измерение ее длины на различных этапах нагружения. Традиционно для этих целей применяется оптическая микроскопия [2], обеспечивающая высокую точность, однако данный подход трудоемок, субъективен и требует значительных временных затрат. В связи с этим актуальной задачей является внедрение автоматизированных методов анализа изображений [3], позволяющих ускорить обработку результатов и снизить влияние человеческого фактора.

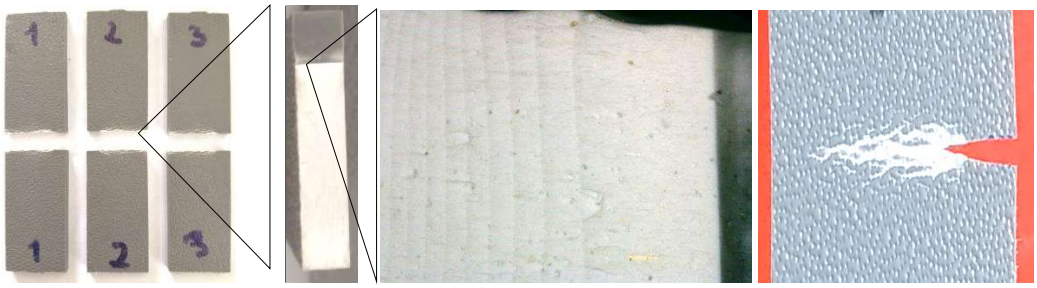
Цель

Повышение точности определения длины трещины при проведении испытаний на трещиностойкость

Материалы и методы

Объект исследования — плоские образцы АБС-пластика размерами 100×25×5 мм с предварительно сформированным острым надрезом. Испытания на трещиностойкость проводили в режиме циклического растяжения на универсальной машине Instron 5567 по методике [4]. Поверхность разрушения анализировали на 7 фиксированных этапах (ступенях) нагружения, соответствующих номерам циклов: 1, 4, 7, 10, 14, 17, 20. Для каждого образца выполняли два типа измерений длины трещины: прямой оптический метод с использованием микроскопа и косвенный автоматизированный метод, основанный на цифровом анализе изображений (ЦАИ) и пересчете пиксельных размеров в единицу длины.

Общий вид исследуемой поверхности разрушения и процесса распространения трещины представлены на рисунке 1, б, в и г.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. **Общий вид испытанных образцов АБС-пластика (а), исследуемой поверхности разрушения (б), ступеней трещины (в) и ее роста (г)**

Результаты и их обсуждение

Таблица 1. **Сопоставление микроскопических и с использованием ЦАИ измерений длины ступеней трещины**

№ образца	№ цикла	Оптическая микроскопия, мкм	ЦАИ, мкм	Разница, %	Примечание
1	1	624	213	65,9	Высокий разброс на циклах 14, 17, 20
	4	97	157	61,9	
	7	89	112	25,8	
	10	64	56	12,5	
	14	62	117	88,7	
	17	64	112	75	
	20	64	107	67,2	
Средняя				**56,7**	
2	1	486	96	80,2	Наименьшая средняя разница значений, циклы 7, 10, 17, 20 с очень малой погрешностью
	4	74	126	70,3	
	7	65	56	13,8	
	10	55	56	1,8	
	14	56	29	48,2	
	17	53	51	3,8	
	20	59	66	11,9	
Средняя				**32,9**	
3	1	515	102	80,2	Наибольшая средняя разница значений, максимальные расхождения на циклах 7, 10, 14
	4	92	173	88	
	7	60	122	103,3	
	10	47	102	117	
	14	42	82	95,2	
	17	44	14	68,2	
Средняя				**84,7**	
Общая				***58,1***	Среднее по всем измерениям

В ходе эксперимента были получены данные для трех образцов (табл. 1). Сравнительный анализ показал, что относительная разница между методами варьируется в широких пределах – от минимальных значений (менее 2 %) до значительных расхождений, достигающих 88,7 % (образец №1, цикл 14). Однако при интерпретации этих результатов

необходимо учитывать, что исследовался исключительно начальный участок кинетики разрушения (первые 20 циклов нагружения), тогда как полное разрушение образцов происходило в среднем на 170-м цикле.

Наилучшая сходимость наблюдается для образца №2, где средняя разница по всем ступеням минимальна, а на циклах 7, 10, 17 и 20 погрешность практически отсутствует. Это свидетельствует о том, что при высоком качестве исходного изображения и четкой видимости фронта трещины ЦАИ обеспечивает точность, сопоставимую с микроскопией. Можно ожидать, что на основной части кинетической кривой (до 170-го цикла) точность обработки методом ЦАИ будет существенно выше, что подтверждает его практическую пригодность для автоматизации измерений.

Заключение

Выполнено сопоставление прямого микроскопического метода и ЦАИ для измерения длины усталостной трещины в АБС-пластике на начальном этапе циклического нагружения (до 20-го цикла из 170 до полного разрушения). Установлено, что ЦАИ демонстрирует точность, сопоставимую с оптикой, при качественной видеосъемке и четкой визуализации фронта трещины. Выявленные расхождения на начальных длинах трещины (50–200 мкм) обусловлены главным образом пиксельной дискретизацией и размытостью границ зоны разрушения, что приводит к завышенным или заниженным значениям при косвенном пересчете. Однако, учитывая, что исследовался лишь самый сложный для распознавания начальный участок, а основная часть кинетической кривой приходится на более равномерные участки длины трещины (7-й цикл и далее), можно утверждать, что реальная точность метода на всем протяжении испытаний будет значительно выше. Таким образом, метод ЦАИ является перспективным инструментом для автоматизации испытаний на трещиностойкость.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ Т25ИИ М-017, а также по заданию 6.1.08 ГПНИ 6 «Механика, металлургия, контроль в интеллектуальных системах».

1. ГОСТ 34256-2017. Пластмассы. Определение распространения усталостной трещины при растяжении методом линейно-упругой механики разрушения (LEFM). Введен 2018–07–01. М. : Стандартинформ, 2017. 25 с.
2. Шилько С.В., Орешкевич Е.Г., Сазанков А.П. Методика автоматизированного определения геометрических параметров трещины при проведении механических испытаний конструкционных материалов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 ноября 2025 г.) : в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель : БелГУТ, 2025. – Ч. 1. − С. 130–132.
3. Сазанков А.П. Методика формирования начального надреза на образце для определения распространения трещины при растяжении // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы VIII Респ. научно-техн. конф. мол. ученых, Гомель, 22−24 окт. 2024 г. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2024.− С. 71–73.
4. ПМИ № 101-2026. Программа и методика испытаний. Методика определения трещиностойкости полимерных композиционных материалов при циклическом растяжении. Утверждена 2026–19–08. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2026. 13 с.

КИНЕТИКА НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СУЛЬФАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Н.М. Свирид, Д.Ю. Гульпа, И.И Кузьмар

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Цель

Изучение кинетических закономерностей процесса электроосаждения металлов из многокомпонентного сульфатного электролита в условиях нестационарного (импульсного и реверсивного) электролиза при варьировании длительности импульсов и пауз.

Материалы и методы

В продолжение ранее начатых исследований [1], изучение кинетики электродных процессов проведено в многокомпонентном водном электролите следующего состава (г/л): сульфат никеля(II) гептагидрат ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$) — 200; хлорид натрия (NaCl) — 2,5; борная кислота (H_3BO_3) — 25; фторид калия (KF) — 2,5; сульфат натрия (Na_2SO_4) — 50; пероксодисульфат калия ($K_2S_2O_8$) — 3. Наличие в растворе борной кислоты обеспечивает буферные свойства, а фторид- и сульфат-ионы способствовали повышению электропроводности. Пероксодисульфат калия выступал в роли деполяризатора и модификатора процесса кристаллизации. Электрохимические измерения выполнены на импульсном потенциостате-гальваностате «Elins P-45X» в гальваностатическом импульсном режиме при варьировании отношения длительности импульса к длительности паузы ($\tau_и$:$\tau_п$): 1) изменяли длительность катодного импульса при постоянной паузе (10:70, 30:70, 70:70 мс); 2) изменяли частоту следования импульсов при сохранении их соотношения (100, 10, 1 Гц). Результаты пересчитаны с учетом хлорсеребряного электрода. Проведен анализ хронопотенциограмм в координатах «время (t) — перенапряжения (η)» и поляризационных кривых в координатах «средняя плотность тока ($i_{ср}$) — потенциал (E)» [2].

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных хронопотенциограмм (рис. 1) показал, что при включении тока происходит резкий скачок перенапряжения, связанный с зарядом емкости двойного электрического слоя и переходными процессами, после чего система выходит на стационарный режим. С ростом средней плотности тока от 0,2 до 6 А/дм^2 величина стационарного перенапряжения закономерно увеличивается, что свидетельствует об усилении диффузионных ограничений в приэлектродном слое.

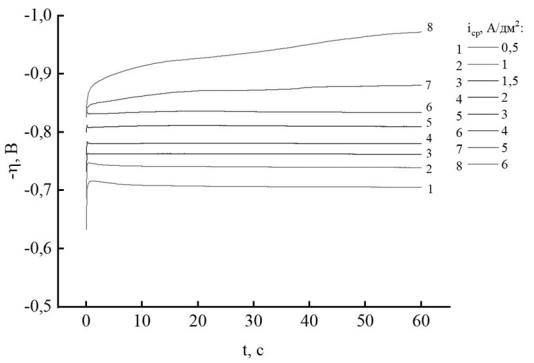


Рис. 1. **Хронопотенциограммы катодного процесса**

Как видно из рис. 2, наибольшая катодная поляризация наблюдается при минимальной длительности импульса (режим 10:70 мс). При $i_{ср}$= 2 А/дм^2 потенциал катода равен –0,83 В. Это объясняется тем, что при поддержании одинаковой средней плотности тока, уменьшение времени импульса ($\tau_п$) требует значительного увеличения амплитудной плотности тока в моменты его протекания. Высокая амплитудная плотность тока приводит к быстрому обеднению приэлектродного слоя ионами никеля и сдвигу потенциала в более электроотрицательную область. Увеличение $\tau_и$ до 70 мс снижает амплитудное значение тока, что облегчает процесс разряда ионов и сдвигает кривую в положительную сторону (потенциал около –0,65 В при 2 А/дм^2).

Исследование влияния частоты следования импульсов при сохранении их соотношения (режимы 100, 10, 1 Гц) выявило иную кинетическую картину рис. 2.

Рост частоты тока (от1 до 100 Гц) повышает от –0,65 В до –0,85 В перенапряжение осаждения: паузы 7 мс недостаточно для релаксации диффузионного слоя и восполнения ионов Ni^{2+}, тогда как пауза 700 мс (режим 300:700 мс) восстанавливает их концентрацию. Отрицательное смещение потенциала в режимах 10:70 и 3:7 интенсифицирует зародышеобразование, способствуя получению плотных мелкокристаллических осадков.



а б

Рис. 2. **Влияние параметров импульсного режима на катодную поляризацию: а — частоты следования импульсов при постоянном соотношении импульс/пауза (1 – постоянный ток, 2 - 100, 3 - 10, 4 - 1 Гц); б — длительности катодного импульса при постоянной паузе 70 мс (5 – постоянный ток, 6 - 10, 7 - 30, 8 - 70 мс)**

Заключение

Показано, что применение импульсных режимов электролиза позволяет эффективно управлять кинетикой электрокристаллизации из многокомпонентного сульфатного электролита. Установлено, что при постоянной паузе сокращение длительности катодного импульса приводит к росту поляризации за счет увеличения амплитудной плотности тока. При сохранении скважности высокочастотные режимы вызывают большее перенапряжение по сравнению с низкочастотными из-за неполной релаксации диффузионного слоя во время коротких пауз. Варьирование данных параметров открывает широкие возможности для направленного изменения структуры электролитических осадков.

1. Свирид, Н. М. Поведение никелевой и алюминиевой подложек в сульфатном электролите никелирования / Н. М. Свирид, Д. Ю. Гульпа, И. И. Кузьмар // Инновационные материалы и технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Минск, 27–30 апреля 2026 г. – Минск : БГТУ, 2026. – С. [100-103]. – ISBN 978-985-897-361-2.
2. Хмыль, А. А. Гальванические покрытия в изделиях электроники / А. А. Хмыль, В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. — Минск : Интегралполиграф, 2017. — 480 с. — ISBN 978-985-6845-55-3.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «СУПЕРФЛУВИС» ДЛЯ КРАНИАЛЬНЫХ ИМПЛАНТОВ

В.А. Стратанович[1], И.С. Шилько[1], Д.В. Брель[1], А.И. Довнар[2]

[1] Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vitalystratanovich.mpri@gmail.com

[2] Гродненский государственный медицинский университет

Введение

Применение полимерных материалов и композитов на их основе при пластике костей черепа в качестве краниальных имплантов повышает эффективность нейрохирургических операций. К числу ключевых преимуществ относят биосовместимость, радиопрозрачность, позволяющую проводить точную МРТ- и КТ-диагностику без артефактов. Низкая тепло- и электропроводность исключает перегрев тканей, а также защищает от воздействия внешних электрических полей. Полимеры и композиты на их основе позволяют создавать персонализированные импланты с помощью аддитивных технологий и многоосевой механической обработки [1, 2], точно повторяющие анатомию пациента, что сокращает время операции и улучшает эстетические и функциональные результаты. Переход от металлических имплантов к полимерным – шаг к более эффективной и индивидуализированной нейрохирургии, существенно улучшающий качество жизни пациентов [3, 4]. Целью данной работы является исследование возможности применения отечественного композиционного материала «Суперфлувис» ТУ BY 400084698.178-2006 на основе политетрафторэтилена и модифицированных углеродных волокон для краниальных имплантов по комплексу механических, электро- и теплофизических свойств.

Материалы и методы.

Методика исследования включала исследование и сопоставление свойств фрагментов теменных костей человека, полученных интраоперационно при резекционной краниэктомии, и полимерного композиционного материала «Суперфлувис». Образцы костей после извлечения помещали в физиологический раствор, стерилизовали этиленоксидом при 55°С в течение 2 ч 45 мин и хранили при –40°С не более 7 суток. Физико-механические испытания проводили на сериях из 10 образцов при нормальных условиях (20–25°С): статическое сжатие осуществляли на машине FYWN-5K, ударную вязкость по Шарпи – на маятниковом копре Wance PIT550J-3 с энергией удара 2 кДж для костей и 4 кДж для композита. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139. Электрофизические измерения выполняли с помощью измерителя иммитанса Е7-20 при диаметре электродов 18 мм и расстоянии между ними 42 мм, рассчитывали удельное поверхностное электрическое сопротивление. Полученные данные сопоставляли со справочными характеристиками ПТФЭ и титанового сплава Ti6Al4V. Статистическую обработку результатов проводили с использованием t-критерия Стьюдента, различия считали значимыми при $p<0,05$. Все манипуляции с биологическим материалом выполняли с соблюдением требований Хельсинкской декларации.

Результаты и их обсуждение.

В ходе работы проведено сравнительное изучение физико-механических, физических и электрофизических свойств теменных костей черепа человека и полимерного композиционного материала «Суперфлувис». Испытания на статическое сжатие показали, что предел пропорциональности для костной ткани (34,03±2,62 МПа) в 5,7 раза превышает аналогичный показатель для композита (5,98±0,8 МПа, $p<0,05$). Максимальное напряжение при сжатии у кости составило 37,79±4,25 МПа, у материала «Суперфлувис» – 27,22±1,32 МПа. Однако характер разрушения принципиально различался: кость разрушалась хрупко, тогда как

«Суперфлувис» демонстрировал пластическое течение, что подтверждается относительной деформацией при разрушении (9,95±0,23% против 4,8±0,51% у кости) и более высоким модулем упругости у кости (1,69 ГПа против 1,16 ГПа). Следует отметить, что модуль упругости композита (1,16 ГПа) значительно ближе к модулю упругости губчатой кости (0,5–1,5 ГПа), чем у компактной кости (1,7 ГПа). Это свидетельствует о том, что полимерный композит способен более физиологично распределять нагрузку, снижая риск резорбции костной ткани вокруг импланта. Наиболее значимым преимуществом композита оказалась ударная вязкость: 30,41±4,5 кДж/м^2, что в 12 раз выше, чем у кости (2,47±0,45 кДж/м^2). При этом в ряде экспериментов образцы полимерного композита не разрушались, а лишь изгибались, что свидетельствует о высокой трещиностойкости и отсутствии осколков – критически важном факторе для имплантатов, исключающем травмирование окружающих мягких тканей и сосудов при возможных динамических воздействиях. Пластический характер разрушения материала «Суперфлувис» также указывает на его способность поглощать энергию удара без образования острых краёв, что принципиально отличает его от кости черепа или имплантов из хрупких материалов.

По плотности полимерный композит (1,99 г/см^3) ближе к кости (1,59 г/см^3), чем титан (4,43 г/см^3), что снижает нагрузку на череп и обеспечивает более комфортное ощущение для пациента без эффекта «тяжести». Удельное поверхностное электрическое сопротивление материала «Суперфлувис» составляет $2{,}3 \cdot 10^6$ Ом, что близко к значению для кости ($1{,}2 \cdot 10^6$ Ом) и кардинально отличается от проводящего титана (менее 10^{-6} Ом), обеспечивая радиопрозрачность и отсутствие артефактов при МРТ и КТ-диагностике. Это свойство имеет особое значение в нейрохирургии, поскольку позволяет проводить точный мониторинг состояния мозга и импланта в послеоперационном периоде, не прибегая к сложным методикам коррекции изображений. Теплопроводность композита (0,35 Вт/м·К) практически идентична костной ткани (0,26–0,34 Вт/м·К) [5], тогда как у титана она составляет 7,3 Вт/м·К [6], что исключает перегрев или переохлаждение мозга при внешних температурных воздействиях (например, при длительном пребывании на солнце или в холодную погоду).

Выводы

Композиционный материал «Суперфлувис», уступая костной ткани по прочности на сжатие, значительно превосходит её по пластичности и ударной вязкости, что минимизирует риск хрупкого разрушения импланта и обеспечивает его надёжность при динамических нагрузках. По теплопроводности и электропроводности он максимально приближен к нативной кости, что обеспечивает полную совместимость с современными методами визуализации, а также способствует улучшению качества жизни пациентов за счёт отсутствия температурного дискомфорта.

Благодарности

Работа выполнена в рамках ГПНИ 7 «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.4. «Порошковые и композиционные материалы», задание 4.2.2 «Разработка антифрикционных композитов и фильтрующих систем.

1. Hieu L.C. et al. Design and manufacturing of cranioplasty implants by 3-axis cnc milling // Technology and Health Care. – 2002. – Vol. 10, No. 5. – P. 413-423.
2. Hieu L.C. et al. Design for medical rapid prototyping of cranioplasty implants // Rapid Prototyping Journal. – 2003. – Vol. 9, No. 3. – P. 175-186.
3. Довнар, А.И. Хирургическое лечение дефектов костей свода черепа с использованием отечественного композиционного материала на основе политетрафторэтилена (экспериментальное исследование) : автореф. дис. … канд. мед. наук. – Гродно, 2024. – 28 с.
4. Довнар А.И. Создание персонализированного черепного импланта из материала «Суперфлувис» // Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 50–58. – doi: 10.34883/PI.2024.14.1.045.

5. Zawadzki P. et al. Measurement of thermal conductivity of the cortical bone: experimental studies and comparative analysis // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – Vol. 2540, No. 1. – Art. 012035.
6. Yang X., Richard Liu C. Machining titanium and its alloys // Machining science and technology. – 1999. – Vol. 3, No. 1. – P. 107-139.

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ В РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА

В.А. Стратанович[1], Д.В. Брель[1], А.М. Михалко[2,3]

[1] Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; vitalystratanovich.mpri@gmail.com

[2]Гомельский государственный университет, Гомель, Беларусь

[3]УП «Веза-Г», Гомель, Беларусь

Введение

Развитие микро- и наноэлектроники, оптики и биомедицины требует создания тонкоплёночных фторполимерных материалов с низкой поверхностной энергией, химической инертностью и высокими диэлектрическими характеристиками [1]. Перспективным методом их получения является газоразрядная полимеризация, позволяющая наносить покрытия на подложки сложной геометрии. Среди полимеризационно-способных соединений особый интерес представляют фторгулероды, например октафторциклобутан (ОФЦБ), способный формировать слои, близкие по свойствам к ПТФЭ. Однако структура и свойства таких покрытий существенно зависят от технологических параметров диссоциации мономера: его давления, расхода и степени чистоты, мощности разряда, межэлектродного расстояния. В литературе отсутствует единая картина влияния этих факторов на кинетику роста, морфологию и физико-химическое состояние покрытий, сформированных в разряде ОФЦБ.

Материалы и методы

Формирование покрытий проводили в разрядной плазме в среде октафторциклобутана (*c*-C_4F_8, ОФЦБ, ПФЦБ, Фреон 318) на лабораторной установке, выполненной на базе установки вакуумного напыления УВН 74, в вакуумной камере которой располагалась разрядная коробка (реактор), состоящая из корпуса и двух медных электродов, расположенных на расстоянии 110 мм. Синтез проводили в условиях варьируемой мощности, давления, расхода мономера, межэлектродного расстояния и длительности процесса.

Скорость роста измеряли с помощью массочувствительных кварцевых датчиков, размещённых внутри и вне разрядной коробки, на изолированных и неизолированных подложках. Морфологию и топографию исследовали методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Химический состав и физико-химическое состояние поверхности – методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Поверхностную энергию и её компоненты определяли по краевым углам смачивания тестовыми жидкостями. Для определения влияния технологических факторов на скорость роста покрытий использовали трёхфакторный эксперимент.

Результаты и их обсуждение

Показано, что кинетика роста покрытий имеет сложный немонотонный характер. При относительно невысоких мощностях скорость осаждения слабо зависит от расхода мономера и может снижаться вследствие конкурирующего травления. При повышении мощности вклад расхода становится более выраженным, что связывается с усилением фрагментации молекул

мономера и увеличением концентрации активных частиц в разряде. Зависимость скорости роста от давления носит экстремальный характер: существует область оптимальных давлений, в которой достигается наиболее производительное осаждение, что объясняется изменением локализации разряда и степени конверсии мономера. Увеличение межэлектродного расстояния приводит к снижению скорости роста, при этом максимальные значения наблюдаются вблизи электродов. На подложках, находящихся под потенциалом или заземлённых, скорость осаждения заметно выше, чем на изолированных, что указывает на существенную роль электрических процессов в формировании покрытий.

С использованием методов математического планирования эксперимента установлено, что наибольший вклад в скорость роста вносит мощность разряда; давление также оказывает статистически значимое влияние, а межэлектродное расстояние демонстрирует обратную зависимость. Получены адекватные регрессионные модели для проводящих и диэлектрических подложек, пригодные для оптимизации процесса.

Анализ морфологии показал, что поверхность покрытий имеет кластерно-зеренную структуру, параметры которой зависят от условий осаждения. С ростом мощности наблюдается уменьшение количества, площади и диаметра зёрен, а также снижение шероховатости. При малых мощностях формируется более развитый рельеф с высокой плотностью островковых образований; при повышенных мощностях преобладают более мелкие и упорядоченные фрагменты. Предполагается, что характер зародышеобразования связан с предварительной активацией подложки и наличием активных центров.

Методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии установлено, что химический состав и степень сшивки покрытий определяются чистотой исходного мономера. Беспримесный октафторциклобутан позволяет формировать слои с более высоким содержанием фторуглеродных групп и меньшей степенью сшивки, приближаясь по физико-химическому состоянию к фторполимерам. Использование регенерированного мономера приводит к образованию более жёстких и сшитых покрытий с иным соотношением фторуглеродных связей. С увеличением мощности в спектрах возрастает доля связей, характерных для фторуглеродных фрагментов.

Поверхностная энергия покрытий снижается с ростом мощности и приближается к значениям, характерным для политетрафторэтилена. Минимум полярной составляющей и её кислотно-основных компонент достигается в определённом диапазоне мощностей. С увеличением длительности горения разряда поверхностная энергия сначала заметно снижается, а затем стабилизируется, что может быть связано с накоплением дефектов под действием ультрафиолетового излучения и заряженных частиц.

Выводы

В результате работы установлены закономерности газоразрядной полимеризации октафторциклобутана, позволяющие целенаправленно управлять скоростью осаждения, морфологией, химическим составом и поверхностными свойствами фторполимерных покрытий. Определены технологические условия, обеспечивающие повышенную производительность процесса и формирование слоёв с низкой поверхностной энергией. Показано, что чистота мономера является важным фактором, определяющим степень сшивки и фторуглеродный состав покрытий. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов плазмохимического модифицирования материалов и создания функциональных покрытий с заданными характеристиками.

Благодарности.

Работа выполнена в рамках ГПНИ 7 «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.4. «Порошковые и композиционные материалы», задание 4.2.2 «Разработка антифрикционных композитов и фильтрующих систем.

1. Ясуда, Х. Полимеризация в плазме. М.: Мир, 1988, 376 с.
2. В.А. Стратанович, В.А. Шелестова, В.М. Макаренко, Е.М. Толстопятов, Л.Ф. Иванов, Д.В. Брель. Влияние технологических режимов на скорость роста фторполимерных слоев при плазменной полимеризации октафторциклобутана // 15-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2023), г. Минск, 26 – 29 сентября 2023 г. – с. 439 – 443.
3. В.А. Стратанович, Л.Ф. Иванов, Е. М. Толстопятов, В. А. Шелестова, П. Н. Гракович, В. М. Макаренко, В.А Ломач, Д. В. Брель, А. Н. Деревяго. Структура и свойства покрытий, синтезированных в разрядной плазме октафторциклобутана // 16-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2025), г. Минск, 22 – 25 сентября 2025 г. – с. 434 – 436.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГРЕЧНЕВОЙ ШЕЛУХИ И МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

А.С. Тулейко, С.Н. Бухаров

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

Ухудшение здоровья населения под воздействием избыточного шума выводит проблему акустического загрязнения в ряд приоритетных глобальных экологических угроз. Транспортные системы являются одним из основных источников внешнего шума во всем мире. В настоящее время исследование транспортного шума проводится по следующим аспектам: санитарно-гигиеническому, инженерно-техническому, архитектурно-планировочному, строительно-акустическому и социально-экономическому [1]. Для снижения шумового загрязнения от транспортных систем на прилегающих территориях жилой застройки применяются придорожные шумовые барьеры, также называемые в литературе устройствами снижения транспортного шума, или акустическими экранами. В данном способе борьбы с транспортным шумом ключевая роль в снижении уровней шумового воздействия принадлежит акустическим материалам, входящим в состав акустических экранов, к числу которых относятся звукопоглощающие и звукоизолирующие композиты и слоистые конструкции [2]. Звукопоглощающие материалы и слоистые конструкции составляют основу для проектирования и строительства акустических экранов. Особое внимание уделяется получению легких, высокопрочных, экологически безопасных композитов [3].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование коэффициента звукопоглощения композитов, изготовленных с использованием гречневой шелухи и модифицированной эпоксидной смолы, с целью оценки их акустической эффективности при применении в качестве придорожных шумовых барьерах.

Материалы и методы исследований

Композиты изготавливали толщиной 10 мм и диаметром 100 мм. В качестве натурального компонента использовали гречневую шелуху (ГШ), в качестве связующего полимера – эпоксидную смолу, модифицированную углеродными и пластифицирующими добавками (МЭС). В табл. 1 приведены составы изготовленных образцов.

Таблица 1. **Составы композитов на основе гречневой шелухи и модифицированной эпоксидной смолы**

№ образца	Содержание компонент, г	
	МЭС	ГШ
1	3,2	11,6
2	6,9	11,6
3	11,6	11,6
4	23,2	11,6
5	55,3	11,6

Измерение коэффициента звукопоглощения исследуемых композитов проводили двухмикрофонным методом в диапазоне частот 400 – 1600 Гц по стандарту ISO 10534-2 с использованием системы акустических испытаний звукопоглощающих материалов 4206 («Bruel&Kjær», Дания).

Измерение коэффициента звукопоглощения проводили для каждого образца, а также провели измерение коэффициента звукопоглощения слоистых конструкций, состоящих из набора изготовленных образцов согласно табл. 2.

Таблица 2. **Составы слоистых конструкций**

Слоистая конструкция 1 – СК-1	образец 5+образец 4
Слоистая конструкция 2 – СК-2	образец 5+ образец 4+ образец 3
Слоистая конструкция 3 – СК-3	образец 5+ образец 4+ образец 3+ образец 2
Слоистая конструкция 4 – СК-4	образец 5+ образец 4+ образец 3+ образец 2+ образец 1

Результаты и их обсуждение

Результаты определения нормального коэффициента звукопоглощения в диапазоне частот 400 – 1600 Гц разработанных образцов и звукопоглощающих слоистых конструкций, приведены на рис. 1.

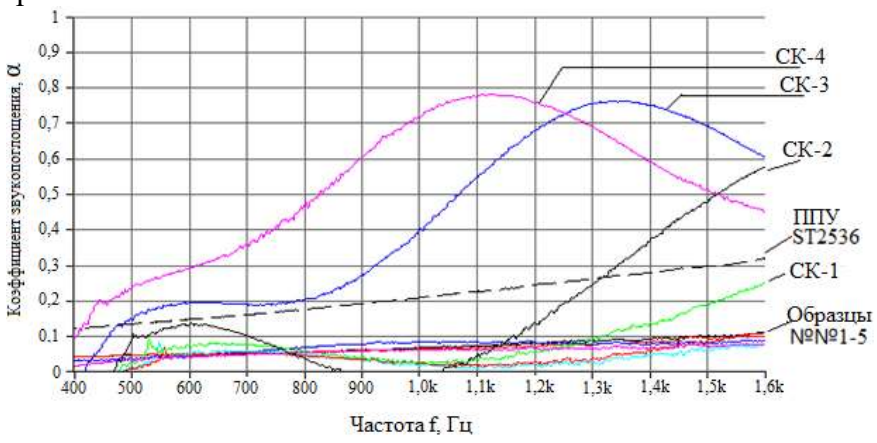


Рис. 1. **Результаты измерения коэффициента звукопоглощения композитов на основе гречневой шелухи и модифицированной эпоксидной смолы и слоистых конструкций из них**

Из рисунка видно, что образцы №№1–5 с исходной толщиной 10 мм характеризуются коэффициентом звукопоглощения до 0,12. Сравнение полученных экспериментальных данных по коэффициенту звукопоглощения слоистых конструкций, показало, что при увеличении толщины показатель звукопоглощения увеличивается во всем диапазоне частот и при толщине около 50 мм (образец СК-4) достигает значений 0,2 – 0,79, что можно характеризовать как высокоэффективное звукопоглощение. Для сравнения на рисунке представлены результаты измерения коэффициента звукопоглощения пенополиуретана ST2536, применяемого как эффективный традиционный звукопоглотитель. Показано, что

при сопоставимых толщинах (20–30 мм) разработанная слоистая конструкция СК-2 превосходит поролон ST2536 по показателю звукопоглощения в исследуемой области частот выше 1,3k Гц.

Таким образом, полученные результаты исследований показывают, что разработанные материалы и слоистые конструкции на их основе могут рассматриваться в качестве перспективных звукопоглощающих элементов для применения в придорожных шумовых барьерах.

1. Снижение шума и вибрации транспортных средств / В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, И.В. Колесников и др. – М.: Машиностроение, 2014. – 334 с.
2. Акустические композиты и шумопонижающие конструкции. Часть I: Экологические безопасные компоненты и нанонаполнители (Обзор) / Бухаров С.Н., Сергиенко В.П., Кожушко В.В., Кудина Е.Ф., Тулейко А.С. // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т.7, №1. – С. 6-22.
3. Marques B. et al. Rice husk cement-based composites for acoustic barriers and thermal insulating layers //Journal of Building Engineering. – 2021. – Т. 39. – С. 102297.

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИАМИДА 6, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДОБАВКАМИ АЛИФАТИЧЕСКОГО ПОЛИКЕТОНА

В.Н. Усова, Ю.М. Кривогуз

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

Введение

В последние годы проявляется устойчивый интерес к исследованию свойств смесей полиамида 6 (ПА6) с алифатическим поликетоном (АПК) [1, 2], где АПК выступает в роли модифицирующего компонента, за счет комплекса его уникальных свойств. Модификация полиамида алифатическими поликетонами в процессе переработки позволяет добиться значительного улучшения его механических и барьерных свойств: возрастает ударная вязкость, повышается пластичность и химическая стойкость. Основой для этого служит высокая совместимость ПА6 и АПК, которая реализуется через образование водородных связей между функциональными группами компонентов. В большинстве работ, описанных в литературе относительно смесей ПА6/АПК, для модифицирования используются концентрации АПК в диапазоне от 10 до 50 мас.%. Однако практически отсутствуют исследования, касающиеся модифицирования ПА6 с использованием малых концентраций АПК, а именно от 0,3 мас.% до 5,0 мас.%, что является существенным пробелом в исследованиях в данном направлении.

Цель работы – исследования влияния малых концентраций АПК на механические свойства ПА6.

Материалы и методы исследований

В настоящей работе базовыми объектами исследования служили ПА6 (марка для контакта с пищевыми продуктами, производства ОАО «Гродно-Азот», РБ) и АПК (марка M330F, производства фирмы «Hyosung Corporation», Ю. Корея). Получение бинарных смесей ПА6 с АПК осуществляли с применением экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK 35/40 с однонаправленным вращением шнеков. Температурный режим в основных зонах смешения материального цилиндра экструдера составлял порядка 240 °С, а частота оборотов шнека 300 об/мин. Анализ механических свойств материалов определяли при испытаниях на растяжение в соответствии с ГОСТ

11262. Образцы имели форму лопаток с размером рабочей части 45x5x2 мм. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Shimadzu AGS-X («Shimadzu Corporation», Япония) при скорости деформации 50 мм/мин.

Результаты и их обсуждение

Проведенное исследование выявило экстремальный характер влияния малых добавок АПК на механические свойства ПА6. Установлено, что оптимальная концентрация АПК для повышения механических показателей составляет 1,0 мас.%, при которой достигаются максимальные значения модуля упругости при растяжении, предела текучести и прочности при растяжении. Данный эффект может быть объяснен следующим образом: при малых концентрациях АПК (до 1,0 мас.%) выступает в качестве эффективного нуклеирующего агента, способствуя формированию более совершенной и ориентированной кристаллической структуры ПА6. Увеличение степени кристалличности приводит к повышению прочности и жесткости материала, что проявляется в увеличении механических показателей. При концентрациях АПК выше 1,0 мас.% происходит нарушение регулярности кристаллической структуры, появление дефектов и снижение степени кристалличности, что проявляется в уменьшении механических свойств ПА6. Снижение относительного удлинения при разрыве наблюдается во всем исследованном диапазоне концентраций АПК, что связано с ограничением движения цепей ПА6 и уменьшением пластичности материала. Полученные результаты позволяют оптимизировать составы композиционных материалов на основе ПА6 с добавками АПК для достижения требуемых механических характеристик

Благодарность

Работа выполнена в рамках задания 4.2.4 «Разработка и совершенствование научных основ модифицирования полиолефинов и гетероцепных полимеров методом реакционной экструзии для создания полимерных композитов с улучшенным комплексом технических свойств» ГПНИ 7 «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма, 7.4 «Порошковые и композиционные материалы» на 2026-2030 годы.

1. High impact strength of aliphatic polyketone/polyamide 6 blends induced by a chemical reaction / Hong Gu Kwon [et al.] // Journal of Elastomers and Plastics. – 2023. – Vol. 55, №4. https://doi.org/10.1177/00952443231158781
2. High impact properties of Polyketone/Polyamide 6 alloys induced by characteristic morphology and water absorption / Atsushi Asano [et al.] // Macromolecules. – 2009. – Vol. 42, № 24. – P. 9506–9514. https:// doi: 10.1021/MA901428z

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ В НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

И.В. Фомихина[1], В.А. Бирюк[2], В.В. Кислицкий[2]

[1]Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь.

[2] Университет гражданской защиты, Минск, Беларусь; prb@ucp.by.

Актуальность

Металлоконструкции нефтехимических производств эксплуатируются при одновременном воздействии механических нагрузок, температур и агрессивных

химических сред. Изменение структуры и свойств металла в таких условиях определяет надёжность оборудования, поскольку его повреждение может привести к авариям, экологическим последствиям и травмированию персонала [1–3]. На характер деградации влияют температура, давление, длительность и цикличность нагружения, состав рабочей среды, а также условия хранения, транспортирования и монтажа. Среди опасных механизмов повреждения выделяются коррозионные процессы, межкристаллитная коррозия, коррозионное растрескивание, ползучесть, усталостная деградация и изменения структуры при длительной эксплуатации [4–6].

Цель исследований

Цель работы – изучить закономерности изменения структуры и свойств металлоконструкций из сталей различных классов, работающих в условиях нефтехимических производств.

Материалы и методы исследования

Исследованы фрагменты металлоконструкций, вышедших из эксплуатации на предприятиях нефтехимического профиля Беларуси: трубопровод из низколегированной стали 09Г2С с коррозионным повреждением; прогоревшая трубка котла из стали 20; трубка линии продувки преобразователя перепада давления из стали 08Х17Н13М2, установленная на установке гидрокрекинга; регенератор жидкого азота из стали 12Х18Н10Т, эксплуатировавшийся при 500 000 циклах в диапазоне температур от −196 до 30 °С при давлении 6 МПа. Морфологию поверхности исследовали на стереоскопическом микроскопе Altami CM0745 и растровом электронном микроскопе Mira (Tescan, Чехия), структуру – на световом микроскопе MeF-3 (Reichert, Австрия), микро-рентгеноспектральный анализ выполняли на Mira с детектором Oxford Instruments Analytical, фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре Ultima IV с использованием CuKα-излучения.

Результаты исследования

Для стали 09Г2С установлено локальное питтинговое повреждение поверхности. Развитие межкристаллитной коррозии ослабляет связи между зёрнами и при наличии растягивающих напряжений способствует образованию трещин по границам зёрен; процесс обусловлен совместным действием механических напряжений и электрохимической коррозии. Коррозионное растрескивание возможно при напряжениях, близких к пределу текучести, а также при существенно меньших напряжениях.

При эксплуатации трубок из стали 20 на внешней поверхности происходит воздействие влаги и паров конденсата, смешанных с продуктами сгорания – сажей, смолой, соединениями серы и соединениями Ca, Mg, Al и Si. Сера и кальций катализируют процессы горения; взаимодействие нагретого кальция с соединениями серы повышает температуру горения и ускоряет прогор трубки. Исходная структура стали 20 характеризовалась феррито-перлитной полосчатостью после горячей прокатки. В зоне повреждения выявлены сфероидизация перлита и измельчение зёрен, что свидетельствует о более высокой температуре эксплуатации.

Для стали 08Х17Н13М2, применяемой в линии продувки установки гидрокрекинга, очаговое повреждение связано с обезуглероживанием и водородной коррозией. Развитие водородной коррозии сопровождается межкристаллитным растрескиванием, утечкой водорода и последующим воспламенением.

Изменение свойств конструкционных сталей зависит от температуры эксплуатации: в интервале 100–300 °С возможно снижение пластичности и изменение прочности; при 200–250 °С свойства практически не изменяются, а при 250–300 °С прочность несколько повышается при снижении пластичности. При температурах выше 400 °С предел текучести и временное сопротивление резко снижаются, а при 600–650 °С наблюдаются высокая

пластичность и потеря несущей способности. При отрицательных температурах прочность повышается, но снижается ударная вязкость и возрастает хрупкость. Высокие давления, циклические нагрузки и агрессивные среды усиливают деградацию металла.

Для регенератора из стали 12Х18Н10Т после 500 000 циклов охлаждения и нагрева в диапазоне −196…30 °С при давлении 6 МПа выявлены признаки старения, образование мартенситной α′-фазы, уменьшение количества феррита и двойников, а также появление дисперсных включений по границам и внутри зёрен. По данным рентгенофазового анализа исходная структура содержала 96 % γ-фазы состава $Cr_{0.19}Fe_{0.7}Ni_{0.11}$ и 4 % α-Fe; после эксплуатации образовались мартенситная α′-фаза и карбонитридная фаза $Fe_3C + FeN_{0,0589}$, связанные с перераспределением углерода и диффузией азота из рабочей атмосферы.

Выводы

Установлено, что сочетание температуры, давления, циклических нагрузок и агрессивной среды приводит к закономерным изменениям структуры и свойств сталей различных классов. Для исследованных объектов характерны питтинговая и межкристаллитная коррозия, коррозионное растрескивание, обезуглероживание и водородная коррозия, а при длительной циклической эксплуатации – старение и фазовые превращения. Основными причинами деградации исследованных металлоконструкций являются старение, обезуглероживание, наводораживание и межкристаллитная коррозия.

1. Венгринович, В. Л. Научный анализ и оценка рисков в системах безопасности // Наука и инновации. – 2013. – № 6. – С. 4–7.
2. Жарский, И. М. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин : учебник. – Минск: Выш. шк., 2010. – 336 с.
3. Хохлачева, Н. М. Коррозия металлов и средства защиты от коррозии : учеб. пособие / Н. М. Хохлачёва, Е. В. Ряховская, Т. Г. Романова. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 118 с.
4. Ентус, Н. Р. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н. Р. Ентус, В. В. Шарихин. – М. : Химия, 2004. – 154 с.
5. Атлас производственных разрушений различных конструкций / А. Ф. Ильющенко, Л. В. Маркова, В. А. Чекан, И. В. Фомихина, В. В. Коледа. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 312 с.
6. Фомихина, И. В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них : дис. … д-ра техн. наук : 05.16.09. – Минск, 2018. – 398 л.
7. Фомихина, И. В. Методы контроля и пути устранения технологических и эксплуатационных дефектов в конструкционных сталях. – Минск : Беларус. навука, 2024. – 302 с.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ НА ФОТОСТАБИЛЬНОСТЬ БЕТАНИНА В КОНЪЮГАТАХ ХИТОЗАНА И ПЕКТИНА С ФЕНОЛЬНЫМИ КИСЛОТАМИ

Е.В. Хаинская, К.С. Гилевская

ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси», Минск, Беларусь; 5887752@mail.ru

Введение

Природные красители и антиоксиданты, в частности бетанин, обладают высокой биологической ценностью, однако их применение ограничено низкой устойчивостью к воздействию света, кислорода и температуры [1]. Перспективным подходом к решению этой проблемы является инкапсулирование в полисахаридные матрицы хитозана (Хит), пектина (Пект) и их производных, например, модифицированных природными антиоксидантами (галловой (ГК) или феруловой (ФК) кислотами) [2]. Однако влияние такой модификации на фотохимическое поведение инкапсулированных БАВ изучено недостаточно, а литературные данные о роли фенольных фрагментов неоднозначны.

Цель

Получение инкапсулированных форм бетанина на основе Хит, Пект и их производных с фенольными кислотами, а также сравнительный анализ их УФ-стабильности.

Материалы и методы

В работе использовали Хит (M_w~30 кДа, СД>90%) и Пект (M_w~120 кДа, СЭ=32%, СА=18%), а также их конъюгаты с ГК и ФК, синтезированные карбодиимидным методом (ХитГК (степень пришивки (СП)~28%), ПектГК (СП~20%), ПектФК (СП~16%)). Капсулирование бетанина проводили методом ионотропного гелеобразования в присутствии сульфата натрия (для Хит) или хлорида кальция (для Пект); маркировка образцов представлена в табл. 1. Фотостабильность изучали при облучении УФ-А светом (320–400 нм, мощность излучения 0,6 мВт/см^2, общая световая экспозиция 3,6 мВт·ч/см^2, 6 ч). Спектры поглощения регистрировали в диапазоне 200–900 нм на спектрофлуориметре СМ2203 (Solar, Беларусь).

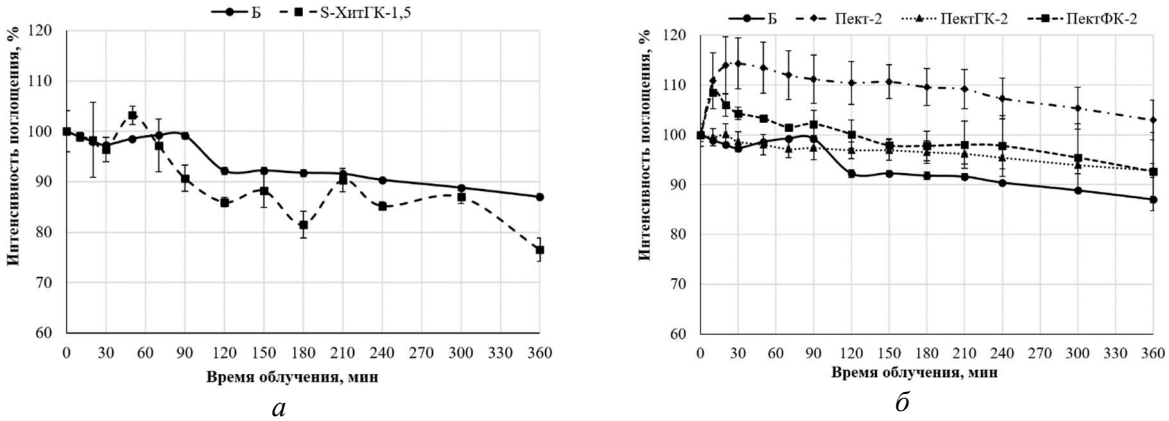
Таблица 1. **Капсулированные формы Б и оцененные эффективность включения и массовая доля**

Полимер	Маркировка образца	Эффективность включения, %	Массовая доля, %
ХитГК	*S-ХитГК-1,5*	19,9±3,3	22,8±2,9
Пект	*Пект-2*	26,1±5,4	34,0±4,7
ПектГК	*ПектГК-2*	25,2±1,8	33,4±1,6
ПектФК	*ПектФК-2*	31,2±3,4	38,4±2,6

Результаты и обсуждение

УФ-облучение нативного бетанина приводит к снижению интенсивности характеристической полосы при ~520 нм на 13,0±0,7%, что согласуется с литературными данными о чувствительности бетаксантинов к окислительной деградации, индуцируемой УФ-светом. Капсулирование в матрицу ХитГК (частицы *S-ХитГК-1,5*), напротив, ускоряет деструкцию: потери интенсивности через 6 ч составили 23,4±4,1% (рис. 1а). Данный прооксидантный эффект, вероятно, обусловлен генерацией активных форм кислорода фенольными группами ГК, ковалентно пришитыми к Хит, при УФ-облучении.

В отличие от ХитГК, пектиновые матрицы эффективно защищают пигмент. Для частиц *Пект-2* потери интенсивности за 6 ч не превышают погрешности измерений (103,0±4,0% от исходного уровня). Конъюгаты Пект с ГК и ФК также обеспечивают высокую защиту: потери для *ПектГК-2* и *ПектФК-2* составили 7,2±1,4 и 8,3±7,0% соответственно (рис. 1б).



а *б*

Рис. 1. **Графики зависимости интенсивности поглощения капсулированных форм бетанина от времени облучения при 500–540 нм для хитозановых (а) и пектинатных (б) частиц**

Кинетика фотодеструкции во всех случаях удовлетворительно описывается уравнением псевдопервого порядка (R^2=0,74–0,94). Рассчитанные константы скорости (k) и относительные константы ($k_{отн} = k_Б/k$) представлены в табл. 2. Капсулирование в пектиновые матрицы снижает скорость фотолиза бетанина в 1,2–2,1 раза по сравнению с нативным красителем. Наибольший защитный эффект достигается при использовании конъюгата ПектГК (k=0,18·10^{-3} мин$^{-1}$, $k_{отн}$=2,06). Матрица на основе ХитГК, напротив, увеличивает скорость деструкции ($k_{отн}$=0,63). Защитный эффект пектиновых матриц, вероятно, обусловлен образованием плотной гидрогелевой сетки, ограничивающей диффузию кислорода и экранирующей краситель от прямого УФ-воздействия, а также возможным тушением синглетного кислорода карбоксильными группами полигалактуроновой кислоты.

Таблица 2. **Константы скорости фотодеструкции бетанина**

Образец	$k \cdot 10^3$, мин$^{-1}$	R^2	$k_{отн}$
Бетанин	0,37	0,88	1,00
S-ХитГК-1,5	0,59	0,74	0,63
Пект-2	0,28	0,89	1,32
ПектГК-2	0,18	0,94	2,06
ПектФК-2	0,32	0,94	1,16

Выводы

Выбор полимерной матрицы критически влияет на фотостабильность бетанина. Капсулирование в матрицу ПектГК обеспечивает максимальную защиту: снижение интенсивности поглощения в области ~520 нм через 6 часов составило 7,2±1,4% против 13,0±0,7% для нативного бетанина. Напротив, конъюгат ХитГК ускоряет деструкцию бетанина (потери 23,4%). Эффективность фотопротекторных свойств исследованных систем уменьшается в ряду: *ПектГК-2* > *Пект-2* > *ПектФК-2* >> *S-ХитГК-1,5*.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ГКНТ (договор №Х24КИТГ-002).

1. Sadowska-Bartosz, I. Biological Properties and Applications of Betalains / I. Sadowska-Bartosz, G. Bartosz // Molecules. – 2021. – Vol. 26, №9. – P. 2520.
2. Zhou, Q. Phenolic acid-chitosan derivatives: An effective strategy to cope with food preservation problems / Q. Zhou, W. Lan, J. Xie // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 254, part 3. – P. 127917.

РАЗРАБОТКА МНОГОЗОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ FGF-ПРИНТЕРА С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Хантимерова Ю.М.[1,2]

[1]Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия; proba_pera91@mail.ru

[2]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Целью работы является разработка и исследование многозонной системы контроля температурных режимов экструзионной головки FGF-принтера с индукционным нагревом

для получения композиционных изделий с воспроизводимыми функциональными свойствами. Работа выполняется в рамках паспорта научной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля» и соответствует тематике секции «Современные методы исследования и моделирования функциональных свойств материалов».

Объектом исследования выступает экструзионная головка FGF-принтера (Fused Granular Fabrication) [1] собственной конфигурации, предназначенная для послойного формирования изделий из гранулированных термопластов и полимерных композитов (рис.1). Одной из ключевых особенностей разработанной конструкции является наличие четырёх независимых зон нагрева: зоны подачи гранул, зоны предварительного расплава, рабочего цилиндра и сопла. Каждая зона оснащена индивидуальным индукционным нагревателем и общим контуром водяного охлаждения, что обеспечивает быстрый выход на заданный температурный режим и предотвращение термической деградации материала в смежных участках. Система контроля реализована на базе программируемых ПИД-регуляторов ОВЕН, обеспечивающих стабилизацию температуры в каждой зоне с точностью ±1,5 °C.

В ходе экспериментальных исследований по ранее апробированной методике [2] для каждого типа полимера и композита подобраны оптимальные температурные профили по четырём зонам. Установлено, что независимое регулирование позволяет создать плавный градиент вязкости расплава от зоны подачи к соплу, что критически важно для равномерного распределения наполнителя в композитах. В табл. 1 представлены оптимизированные температурные режимы для ряда исследованных материалов.

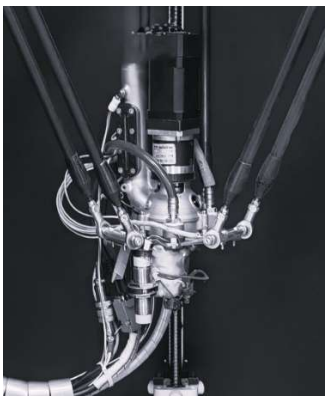


Рис.1. **Экструзионная FGF-головка для 3д-принтера**

Внедрение водяного охлаждения в зонах подачи и предварительного расплава позволило исключить преждевременное спекание гранул и образование пробок, что ранее являлось основной причиной нестабильности экструзии. Комбинированное применение индукционного нагрева и активного охлаждения сократило время выхода на рабочий режим с 12 до 3 минут по сравнению с традиционными резистивными нагревателями.

Таблица 1. **Оптимальные температурные параметры по зонам экструзионной головки**

Материал	Зона загрузки, °C	Предварительный расплав, °C	Рабочий цилиндр, °C	Сопло, °C
PLA	45	110	170	180
PETG	50	160	225	235
PA6 + 30 % стекловолокно	60	180	250	260

Механические испытания образцов, полученных при оптимизированных температурных профилях, показали повышение прочности на разрыв на 18–25 % и снижение пористости до 0,8–1,3 % относительно базовых режимов однозонного нагрева. Разработанная система контроля обеспечивает высокую повторяемость функциональных свойств композиционных изделий при переходе между различными типами полимерных материалов.

Таким образом, четырёхзонная архитектура с ПИД-регулированием на базе контроллеров ОВЕН и индукционным нагревом представляет собой эффективный прибор контроля технологического процесса FGF-печати, позволяющий целенаправленно управлять функциональными свойствами получаемых композитных изделий.

1. Хантимеров С.М., Димич В.В., Хантимерова Ю.М. Устройство для аддитивного формования изделий из термопластичного сырья: патент на полезную модель RU 241812 U1. — Заявка № 2025136608 от 17.12.2025; опубл. 02.03.2026.
2. Хуснутдинова Э.М., Хантимерова Ю.М. Разработка технологического процесса контроля качества продукции, произведенной методом FDM-печати // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): материалы Междунар. молодеж. науч. конф.: сб. докл. — Казань, 2023. — С. 618–623.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АБС-ПЛАСТИКА И ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ БИПОЛЯРНЫХ ПЛАСТИН

С.М. Хантимеров[1], Р.Р. Гарипов[1], Ю.М. Хантимерова[2,3]

[1]Казанский физико-технический институт ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия; proba_pera91@mail.ru

[2]Институт прикладных исследований АН РТ, Казань, Россия

[3]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Цель

Углеродные нанотрубки (УНТ) и композиционные материалы на их основе находят всё более широкое применение в различных отраслях техники — электронике и приборостроении, энергетике, авиационно-космической и автомобильной промышленности, сенсорике, а также в системах защиты от электромагнитных излучений и антистатических покрытиях — благодаря уникальному сочетанию высокой электропроводности, механической прочности и малой плотности. Одной из перспективных областей применения электропроводящих полимерных композитов на основе УНТ является их использование в качестве материала биполярных пластин (БПП) топливных элементов и электролизёров, к которому предъявляются требования по высокой электропроводности, коррозионной стойкости и технологичности формирования рельефа газораспределительных каналов сложной конфигурации. Традиционные способы изготовления БПП (прессование композиционных масс, механическая обработка графитовых заготовок) ограничивают свободу проектирования каналов и существенно удорожают мелкосерийное и прототипное производство. В этой связи перспективным представляется применение аддитивных технологий, в частности 3D-печати методом послойного наплавления (FDM/FFF), позволяющей оперативно изготавливать пластины с каналами практически произвольной формы. Целью настоящей работы являлась разработка электропроводящего филамента на основе АБС-пластика и функционализированных УНТ, исследование его электрофизических свойств, а также изготовление и испытание лабораторного образца БПП, полученного методом 3D-печати.

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы использовали АБС-пластик (ABS 1035, Казаньоргсинтез), в качестве электропроводящего наполнителя — функционализированные УНТ [1]. Электропроводящий филамент получали методом смешения компонентов в расплаве с последующей экструзией и намоткой на катушку с диаметром прутка, соответствующим стандарту настольных 3D-принтеров (1,75 мм) на лабораторном двухшнековом экструдере. Из полученного филамента методом FDM-печати по 3D-модели, содержащей систему газораспределительных каналов серпентинного типа и контактные площадки, был изготовлен лабораторный образец БПП (рис. 1). Удельное объёмное электрическое сопротивление филамента и готового образца, а также контактное электрическое сопротивление на границе «пластина–токосъёмник» определяли четырёхзондовым методом; геометрические параметры каналов (ширину, глубину, шаг) контролировали инструментально.

Результаты и их обсуждение

Изготовленный методом 3D-печати образец (рис. 1) воспроизводит заданную геометрию газораспределительных каналов серпентинного типа с приемлемой точностью, что подтверждает технологическую пригодность разработанного филамента для формирования каналов требуемой конфигурации методом послойного наплавления. По результатам измерений определены удельное объёмное электрическое сопротивление образца и контактное электрическое сопротивление на границе «пластина–токосъёмник»; полученные значения сопоставимы с литературными данными для термопластичных композитов, наполненных УНТ [2, 3].

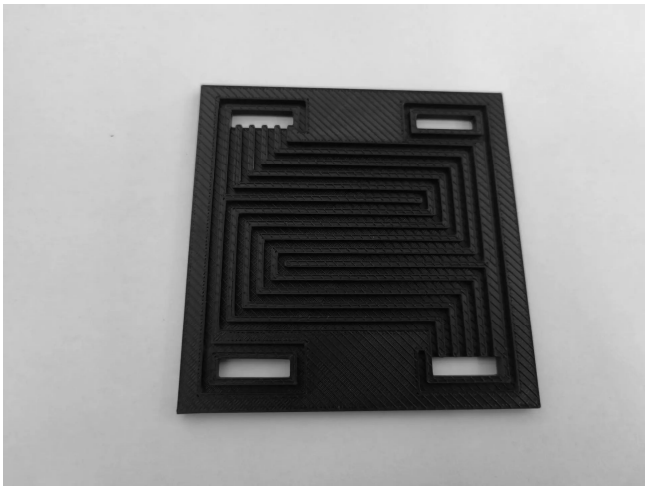


Рис. 1. **Лабораторный образец биполярной пластины с газораспределительными каналами, изготовленный методом 3D-печати из электропроводящего АБС/УНТ-филамента**

Таким образом, показана принципиальная возможность применения 3D-печатных БПП на основе разработанного электропроводящего АБС/УНТ-композита в маломощных топливных элементах, электролизёрах и других электрохимических устройствах, для которых требуются электроды сложной геометрии. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию содержания УНТ и параметров печати с целью повышения электропроводности и снижения контактного сопротивления полученных БПП.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда науки и технологий Республики Татарстан (Соглашение от 05.08.2026 г. №47).

1. Garipov R. R., Khantimerov S. M., L'vov S. G., Shustov V. A., Kurbatova N. V., Suleimanov N. M. Effect of thermochemical treatment on the state of SWNT and on the electrical conductivity of epoxy-SWNT composites // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. — 2020. — Vol. 28, № 12. — P. 1057–1064.
2. Wilberforce T., Ijaodola O., Ogungbemi E. et al. Technical evaluation of proton exchange membrane (PEM) fuel cell performance — a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol.113. – P.109286.
3. Chang H., Kao M., Chih-Hao, Hsu C., Chen Z. The Fabrication of Flow Field Plates for Direct Methanol Fuel Cell Using Lithography and Radio Frequency Sputtering // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2015. – Vol. 15. – pp. 6172-6175.

ФОТОГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

А.В. Шилов, А. В. Медведский

МГУ имени А. А. Кулешова, Могилев, Республика Беларусь; shilov@m.msu.by

В настоящем докладе рассматривается проблема дистанционного оптического контроля ориентации и размеров параллельных вертикальных балок, возникающая при оснастке шахт, в строительстве, а также при монтаже металлоконструкций, требующего высокой точности. Предлагается вариант ее решения, основанный на использовании лазерного уровня и теодолита с регистрирующей ПЗС матрицей.

Исследуется оптическая схема, представленная на рис.1а. В начале системы координат $0xyz$ находится теодолит. Получаемое с его помощью изображение регистрируется матрицей ПЗС. Ее система координат - $0'x'z'$. В плоскости $z = z_0$ имеется линия 123, образованная пересечением плоскости лазерного нивелира с вертикальной (параллельной оси $0z$) балкой. Фотография изображение этой линии 1'2'3' приведена на рис.1*б*. Требуется определить координаты (x, y) точек линии 123.

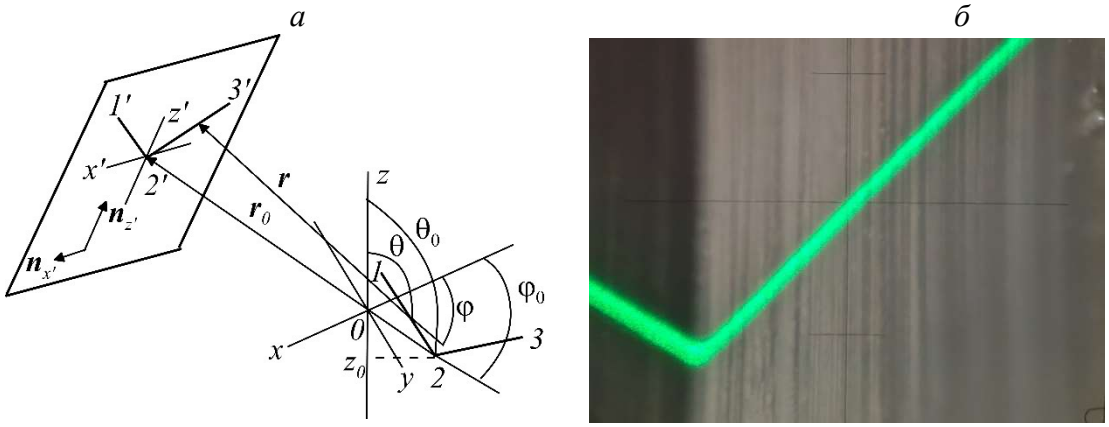


Рис.1. **Геометрия задачи**

В общем случае рассматриваемая задача может быть решена путем измерения угловых координат θ и φ названных точек теодолитом с последующим расчетом их декартовых координат по формулам

$$x_i = -z_0 \tan(\theta_i)\cos(\varphi_i),\ y_i = z_0 \tan(\theta_i)\sin(\varphi_i), \quad (1)$$

где $i = \overline{1,N}$ – номер точки. Координата z_0 считается известной. Ее значение может быть определено предварительно путем измерения угловых координат θ двух параллельных линий типа 123, разделенных известным из паспорта нивелира промежутком.

Однако названный подход является весьма трудоемким. Упрощение измерений возможно на пути обработки цифрового файла координат точек линии 1'2'3', имеющегося в карте памяти ПЗС. Для описания этих координат воспользуемся моделью тонкой линзы. В этом случае выражения для расчета координат x', z' имеют следующий вид

$$x' = |r_0| \frac{\sin\theta \sin(\varphi - \varphi_2)}{\cos(\theta - \theta_2) - \sin\theta \sin\theta_2 [1 - \cos(\varphi - \varphi_2)]}, \quad (2)$$

$$z' = -|r_0| \frac{\sin(\theta - \theta_2) - \sin\theta \cos\theta_2 [1 - \cos(\varphi - \varphi_2)]}{\cos(\theta - \theta_2) - \sin\theta \sin\theta_2 [1 - \cos(\varphi - \varphi_2)]}. \quad (3)$$

Здесь θ_2, φ_2 – угловые координаты точки 2, через которую проходит оптическая ось линзы $|\mathbf{r}_0|$ - расстояние от центра линзы до плоскости изображения (рис.1a). При условии определения по фотографии значений x' и z' для изображения некоторой точки выражения (2), (3) можно рассматривать как систему двух уравнений относительно угловых координат этой точки θ и φ. После решения этой системы искомые декартовы координаты исследуемой линии, лежащей в наклонной к оптической оси системы плоскости рассчитываются на основании (1). Входящие в (2), (3) константы θ_2, φ_2, $|\mathbf{r}_0|$ находятся из (2), (3) предварительно путем одновременного измерения теодолитом угловых координат точек 1, 2, 3 и декартовых координат точек 1', 3' в плоскости снимка (рис.1a).

Экспериментально исследованы две прямоугольных вертикально стоящих балки. Они были расположены слева и справа от теодолита на полутораметровом расстоянии друг от друга. Фотометрировались линии на обоих балках, задаваемые одновременно лазерным уровнем INSPIRITECH G4F16. Измерения выполнены с использованием строительного теодолита 3T5KM с приборной погрешностью составляющей $5''$. Фотографический файл формировался с помощью мобильного телефона Honor 200.

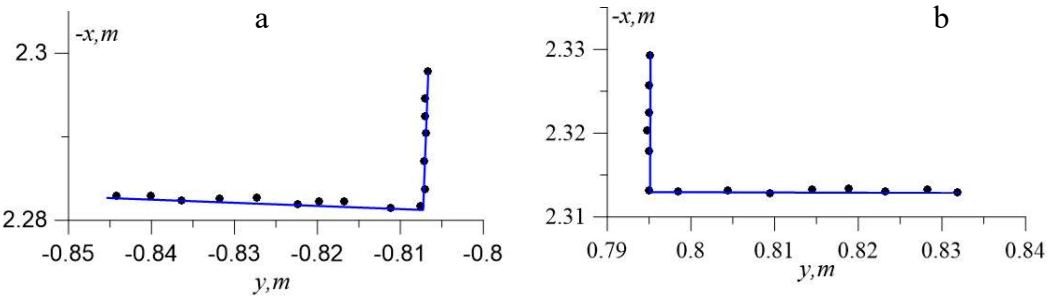


Рис.2. **Сопоставление результатов решения обратных оптических задач по фотометрированию периметров левой (a) и правой (b) прямоугольных балок с помощью теодолита и по фотографиям**

На рис.2 сопоставлены результаты решения обратных задач определения декартовых координат названных линий. Дискретные точки – прямые измерения теодолитом (по формулам (1)), сплошные линии определены по фотографиям по описанной выше схеме.

Отметим удовлетворительное совпадение результатов применения двух рассмотренных методов. Некоторое расхождение результатов двух подходов для крайней левой точки на рис.2а можно объяснить снижением точности использованной модели тонкой линзы при удалении точки наблюдения от оптической оси.

Работа выполнена в рамках ГПНИ РБ «5.1. Фотоника и лазерно-оптические технологии».

Секция 3 ТРИБОЛОГИЯ, ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТИ

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ПОДЛОЖКИ И СТОЙКОСТЬ PVD ПОКРЫТИЙ

М.В. Башаримов, А.Н. Жигалов, Ю.Д. Черняков

ИТМ НАН Беларуси, Могилев

Стойкость износостойких покрытий имеет прямую зависимость с адгезивными свойствами твердосплавного металлорежущего инструмента (подложки), зависящих от ряда факторов, таких как:

Чистота подложки – загрязнение дисперсными частицами приводит к образованию локальных участков с низкой адгезией износостойкого покрытия к подложке, и как следствие быстрому истиранию. Согласно исследованиям [1] загрязнение поверхности устраняется путем введения в технологию ультразвуковой мойки в комбинировании с дополнительной обработкой с помощью плазменного источника с накаленным катодом.

Химический состав подложки – характер химических связей материала покрытия и основного материала должны быть одинаковы. Предполагается создание металлического подслоя износостойкого покрытия (как правило Ti или Cr), что создает более высокий уровень пластичности нитридных (TiN, TiAlN) и карбонитридных (TiCN) покрытий. Подслой работает как «релаксатор» локальных сдвиговых напряжений, обусловленных разницей коэффициента теплового расширения.

Морфология подложки – пористость твердого сплава приводит к неравномерному нанесению покрытия, что будет являются концентраторами разрушения покрытия. Морфология поверхности формируется на этапе спекания твёрдосплавной заготовки и регулируется режимами спекания, таким образом необходимо разработать технологические режимы, обеспечивающие минимальное содержание поверхностных пор, чтобы повысить адгезионные свойства подложки.

Шероховатость подложки – создает высокие локальные давления приводящие к разрушению покрытия на пике шероховатости, а также к появлению затемнений и как следствие не сплошному покрытию. Оптимальный уровень шероховатости для PVD-процессов находится в диапазоне $Ra \approx 0{,}05 \ldots 0{,}15$ мкм. При $Ra < 0{,}02$ мкм снижается площадь механического сцепления фаз. При $Ra > 0{,}3$ мкм возникает эффект затемнения при напылении, снижающий плотность покрытия и создающий локальные концентраторы напряжений у пиков шероховатости.

Внутренние напряжения в подложке – которые приводят к растрескиванию PVD покрытий. Согласно исследованиям [2] внутренние напряжения в твердосплавных пластинах образуются во время их спекания, из-за того, что существуют высокие температурные и деформационные явления, значительные усадки, увеличенная плотность спеченных изделий и другие особенности, что оказывает существенное влияние на образование в спеченных твердых сплавах повышенной плотности дислокаций.

В настоящее время проводится научно-исследовательская работа по изучению влияния указанных факторов на адгезию PVD покрытий на твердосплавные пластины производства ИТМ НАН Беларуси.

1. Башаримов, М. В. Влияние ПИНКа на повышение адгезии PVD-покрытий на твердосплавных пластинах ВҮТС / М. В. Башаримов, А. Н. Жигалов, А. Н. Жариков // Металлургия сплавов – 2026 : материалы Международной научно-технической конференции (Могилев, 4–5 июня 2026 г.) / ГНУ «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси» ; под ред. А. Н. Жигалова. – Минск : Колорград, 2026. – С. 126–128.
2. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них : учебное пособие для вузов / В. С. Панов, А. М. Чувилин. – Москва : МИСИС, 2001. – 432 с.

ПРОТИВОИЗНОСНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ МОНОЭТАНОЛАМИДОВ КАСТОРОВОГО МАСЛА К ИНДУСТРИАЛЬНОМУ МАСЛУ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ф.А. Григорьев[1], Ю.М. Юркова[1,2]

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

[2]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение

Разработка добавок к смазочным материалам на растительной основе соответствует актуальным в настоящее время экологическим приоритетам. По своим свойствам добавка должна быть растворима в базовом смазочном материале и обеспечивать улучшение функциональных характеристик за счёт обеспечения физических или химических процессов в условиях трения [1]. Наукой и техникой разработано и задействовано огромное количество веществ, удовлетворяющих данным запросам, однако экологически безопасными присадками из них может считаться довольно ограниченное число. Среди них модифицированные растительные масла выделяются своей доступностью и высоким сродством к базовым маслам на растительной основе. Продукты модификации растительных масел — сложные эфиры, амиды, эпоксиды — обладают поверхностно-активными свойствами, что делает их перспективными моющими, пленкообразующими компонентами, антиокислительными, антикоррозийными и антифрикционными добавками [2, 3].

Цель работы

Оптимизация состава и установление механизма действия добавок на основе моноэтаноламидов касторового масла в индустриальном масле на основе смесей растительных масел.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования было использовано индустриальное масло на основе растительного сырья «БИО-ГрОИЛ» (ТУ BY 400084698.327–2023), представляющего собой смесь рапсового технического, касторового технического и льняного пищевого масел.

Моноэтаноламиды касторового масла технического качества были предварительно получены из технического касторового масла по оптимизированной методике автора работы [4].

Диаметр пятна износа (показатель износа) полученных смазочных материалов определяли на четырёхшариковой машине трения «ЧШМ-К1» (Технопромкомплект ЛТД, Украина) при осевой нагрузке 40 кгс и времени испытания 60 минут по ГОСТ 9490-75.

Результаты и их обсуждение

Для оценки влияния на функциональные характеристики базового масла было подготовлено десять растворов с различным содержанием добавки (0,01; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5, 1, 1,5, 3, 5 и 10 масс.%).

Согласно результатам проведенных испытаний (рис. 1) зависимость показателя износа от концентрации моноэтаноламидов в базовом масле носит нелинейный характер и достигает максимума в точке, соответствующей 1%-ной концентрации, превышая показатель износа исходного образца масла на 22–36%. В области малых концентраций (до 0,1% включительно) износ снижается на 10–20%, при этом минимальному износу соответствует 0,01% содержание моноэтаноламидов касторового масла. Увеличение содержания присадки до 5 и 10 масс. % приводит к износу, сопоставимому по уровню с базовым маслом.

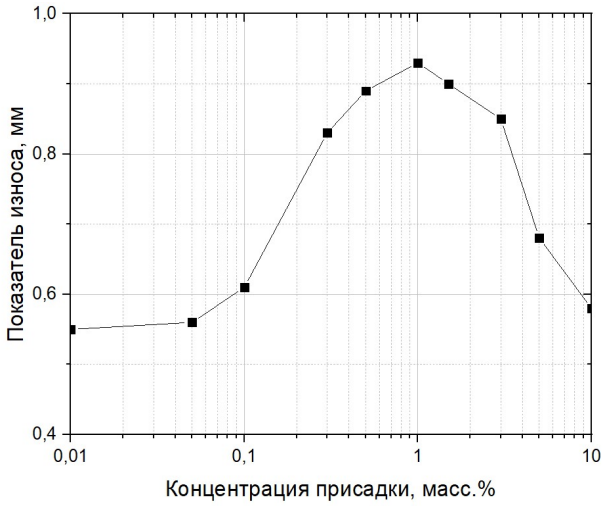


Рис. 1. **Влияние содержания моноэтаноламидов касторового масла на показатель износа базового масла на основе растительного сырья**

Описанный характер изменения показателя износа объясняется как изменением вязкости смеси, так и сорбцией различной природы. В области малых концентраций образуются прочные граничные слои. С повышением содержания присадки растет длина молекулярных цепей, что препятствует проникновению смазочного материала в зону фрикционного контакта. В результате граничный слой разрушается, а скорость его восстановления снижается, что ведет к трению по ювенильным поверхностям. Последующее резкое снижение износа, совпадающее с переходом системы в консистентное состояние, обусловлено плакированием поверхностей трения прочным защитным слоем.

Выводы

Влияние содержания моноэтаноламидов касторового масла на показатель износа базового масла на основе растительного сырья описывается зависимостью нелинейного характера. Полученные в данной работе результаты указывают на то, что снижение износа обеспечивается введением малого количества добавки (до 0,1%). Исходя из этого, можно предположить, что моноэтаноламиды касторового масла могут быть использованы в базовых растительных маслах в качестве противоизносных присадок.

Благодарности

Работа выполнена частично в рамках задания 4.2.1 подпрограммы 7.4 «Порошковые и композиционные материалы» ГПНИ 7 на 2026–2030 годы, а также Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий (проект T25BA-005).

1. Манг Т., Дрезель У. Смазочные материалы. Производство, применение, свойства. Справочник: пер. с англ. 2-го изд. / под ред. В. М. Школьникова — СПб.: ЦОП «Профессия» — 2015.
2. Campanella A. [et al.] Lubricants for chemically modified vegetable oils // Bioresource technology — 2010 (**101**), 245—254.
3. Сафронов О. И. [и др.] Применение амидаминов растительных масел в качестве присадок к смазочным материалам // Вестник ОНУ. Химия — 2018 (**23**), вып. 3 (67) — 29—39.
4. Ганич И. И. Синтез и свойства моно- и диэтаноламидов жирных кислот рапсового масла // Технология-2014: матер. научн.-техн. конф., 4—5 апреля 2014, Северодонецк — 28—29.

ВЛИЯНИЕ ИММЕРСИОННО ОСАЖДЁННОЙ ПЛЕНКИ ЗОЛОТА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЙ Ni–B В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

Ф.А. Зверев[1,2], А.А. Крол[1,2], С.С. Перевозников[1]

[1]Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь

[2]Химический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Покрытия Ni–B представляют интерес при изготовлении изделий приборостроения, точного электронного машиностроения, аэрокосмической техники, микроэлектроники. Это обусловлено тем, что они обладают низким контактным сопротивлением, высокой коррозионной стойкостью, микротвердостью, износостойкостью, хорошо паяются [1]. Известно, что прогрев покрытий Ni-B приводит к повышению их коррозионной стойкости, а также к существенному улучшению триботехнических характеристик [2].

Нанесение тонкой пленки золота (20-40 нм) иммерсионным методом позволяет предотвратить рост контактного сопротивления покрытия Ni–B во времени. Вместе с тем влияние пленки золота на коррозионную стойкость покрытия Ni–B в хлоридсодержащей среде ранее не изучалось.

Цель исследования – изучение влияния иммерсионно осажденной пленки золота на поверхность покрытия Ni–B, до и после его термической обработки, на коррозионную стойкость в хлоридсодержащей среде.

Материалы и методы

Осаждение покрытия Ni–B проводили в гальваностатическом режиме на медную фольгу толщиной 0,2 мм до достижения толщины покрытия 24 мкм. Катодная плотность тока составляла 2 А/дм^2, pH электролита – 4,6, содержание бора в покрытии – 2,8 ат. %. Часть образцов была прогрета в вакууме при температуре 280ºС, на другую часть – нанесена пленка золота. На один из образцов, подвергнутых прогреву, также была нанесена пленка золота. Перед коррозионными испытаниями часть поверхности образцов была изолирована лаком, рабочая область составляла 10×10 мм. Коррозионные испытания проводили в 3,5% растворе NaCl. Запись поляризационных кривых (ПК) осуществляли с помощью потенциостата Elins PI50 Pro2 в ячейке из пирекса с использованием трёхэлектродной схемы подключения. В качестве электрода сравнения использовали хлорид-серебрянный электрод (3,5 моль/л KCl), в качестве вспомогательного электрода – платиновую проволоку. Перед началом записи поляризационных кривых рабочий электрод выдерживали в 3,5 % NaCl до установления стационарного значения потенциала. Скорость развёртки потенциала составляла 10 мВ/мин. Катодную и анодную ветви ПК записывали по отдельности, меняя электролит между измерениями.

Результаты и их обсуждение

Из приведенных на рисунке 1 ПК следует, что нанесение пленки золота на покрытие Ni–B приводит к смещению стационарного потенциала покрытия в катодную область несмотря на то, что золото является благородным металлом и не подвергается коррозии в хлорид-содержащих средах. Причиной установленной закономерности является то, что иммерсионный процесс нанесения золотой пленки не обеспечивает образование сплошного слоя и на поверхности покрытия Ni–B формируется пленка золота с высокой пористостью [3], а коррозионный процесс протекает по механизму работы короткозамкнутых гальванопар. Анализ катодных участков ПК показывает, что на покрытиях с пленкой золота, предельный диффузионный ток восстановления кислорода достигается при смещении потенциала всего на 90 мВ относительно стационарного, в то время как для покрытий Ni–B наблюдается

протяженный участок роста тока с выходом на диффузионное плато при перенапряжении более 240–290 мВ. Указанная особенность катодных участков ПК может быть связана с описанной в литературе высокой каталитической активностью золота в реакции восстановления кислорода [4]. Таким образом, деполяризация сопряженного катодного процесса восстановления окислителя приводит к возрастанию скорости коррозионного процесса. Анализ анодных ветвей ПК покрытий Ni–B (кр. *1*, *2*) показывает, что в области потенциалов –0,25 – (–0,1) В наблюдается линейная зависимость логарифма тока от потенциала, что характерно для кинетического контроля анодной реакции, описывающаяся уравнением Тафеля. Однако при развертке потенциала положительнее –0,1 В происходит стремительный рост тока, что указывает на формирование квазипассивного состояния покрытия при малых анодных поляризациях и переход в область активного растворения при достижении потенциала -0,1 В. Для покрытий Ni–B с пленкой золота при анодной развертке потенциала рост тока происходит гораздо стремительнее, что указывает на практическое отсутствие пассивационных процессов на поверхности, что также связано с работой гальванопар Au-Ni. Таким образом, в ходе проведенного исследования установлено, что нанесение тонкой пленки золота приводит к ухудшению коррозионных свойств покрытий Ni–B.

Коррозионный потенциал при наличии прогрева покрытия сдвигается в область электроположительных значений на 50–100 мВ, причем более эффективно проявляется его сдвиг при первоначальном прогреве покрытия Ni–B и последующем нанесении на него пленки золота (кр. *3*) и совпадает с потенциалом коррозии исходного покрытия Ni–B (кр. *1*). Таким образом, для уменьшения негативного влияния пористой пленки золота на коррозионную стойкость покрытия, перед ее нанесением следует провести прогрев покрытия Ni–B в вакууме при 280 °C.

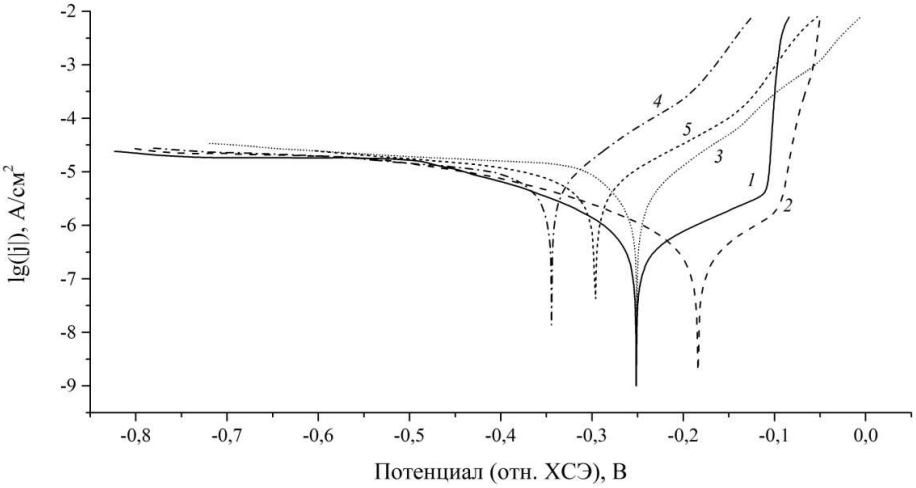


Рис 1. **Поляризационные кривые покрытий Ni–B (*1*, *2*), Ni–B/Au (*3* – *5*) в отсутствие прогрева (*1*, *4*) и в его присутствии (*2*, *3*, *5*) при 280 ºС при разной последовательности нанесения пленки золота и прогрева: *3* – сначала прогрели покрытие, а затем нанесли пленку золота; *4* – сначала нанесли пленку золота, а затем прогрели покрытие**

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы и технологии», задание 2.1.3.03.

1. Bekish Yu. N., Poznyak S. K., Tsybulskaya L. S.Electrodeposited Ni–B alloy coatings: Structure, corrosion resistance and mechanical properties // Electrochimica Acta. – 2010. – Vol. 55, № 7. – P. 2223–2231.
2. Tsybulskaya L.S., Perevoznikov S.S., Shendyukov V.S., Kukareko V.A. Effect of Boron Content and Low-Temperature Annealing on the Structure State and Tribological Properties of Electrodeposited Ni-B Coatings // Electroplating and surface treatment 2022. Vol. 30, №2. P. 4-14. DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_2_4

3. Mousavi M., Kosari A., Mol J. M. C., Gonzalez-Garcia Y. Localised aqueous corrosion of electroless nickel immersion gold-coated copper // Corros. Eng. Sci. Technol. 2022. Vol. 57, № 6. P. 520-530.4.
4. R.R. Adzic, A.R. Despic Electrocatalysis by Foreign Metal Monolayers: Oxygen Reduction on Gold and Platinum // Physical Sciences. – 1975. – Vol. 98. – P. 95–110.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЕИДА Ф НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ УЗЛОВ СТАЦИОНАРНОГО ТРЕНИЯ

Н.Ю. Колпаков

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; Kolpakovnikolaj276@gmail.com

Введение

Важнейшими эксплуатационными характеристиками полимерных композитов, предназначенных для работы в узлах стационарного трения, являются стабильное значение коэффициента трения, высокая износостойкость, а также высокие значения физико-механических и теплофизических характеристик. Преимущественно для работы в таких условиях используются композиционные материалы на основе термостойких полимерных матриц, в качестве которых применяется как ПТФЭ, так и фенилен-бисмалеинимидные связующие [1-2].

Цель работы – исследование влияния Малеида Ф на триботехнические, физико-механические и теплофизические характеристики полимерных композитов.

Материалы и методы исследования

В качестве термостойкой полимерной матрицы композитов использовали политетрафторэтилен (ПТФЭ) (ГОСТ 10007). В качестве термореактивного компонента полимерной матрицы – Малеид Ф (ТУ 2491-362-05800142-2010).

Триботехнические испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал – частичный вкладыш». Использовалось металлическое (сталь марки ст.45) контртело с твердостью до 50 HRC и исходной шероховатостью поверхности трения Rc = 0,52 мкм, диаметром 40 мм и шириной 12 мм. Испытания осуществлялись при скорости скольжения υ = 1 м/с и нагрузке P = 2 МПа, длительность испытаний составила $\tau = 5{,}76 \times 10^4$ с. Температуру размягчения композитов определяли методом Вика на приборе FWV 633.10. Твердость композитов определяли по методу Бринелля путем вдавливания шарика диаметром 5 мм в поверхность плоскопараллельного образца на приборе HP 250. Диаметр отпечатка с точностью до 0,01 мм измеряли на микроскопе МИР-12.

Результаты исследования и обсуждение

На рисунках 1-2 представлены результаты триботехнических испытаний полимерных композитов.

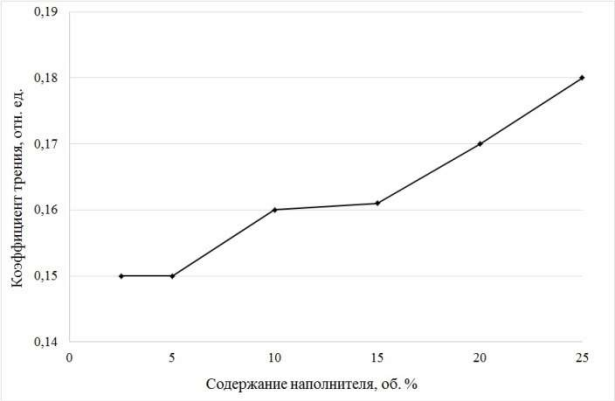


Рис. 1. **Зависимость коэффициента трения полимерных композитов от содержания Малеида Ф**

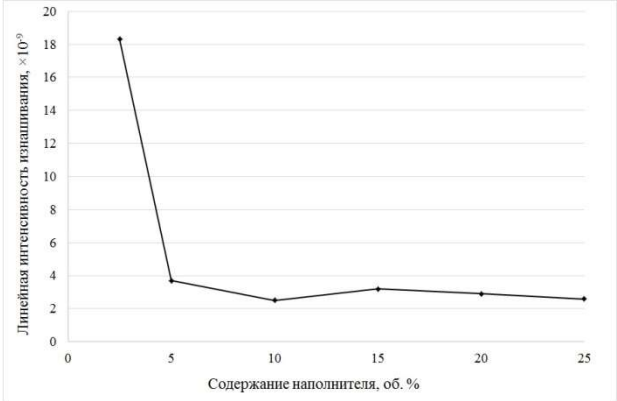


Рис. 2. **Зависимость линейной интенсивности изнашивания полимерных композитов от содержания Малеида Ф**

Видно, что повышение содержания Малеида Ф приводит к увеличению коэффициента трения от 0,15 при 2,5 об. % содержания наполнителя до 0,18 при 20 об. % содержания Малеида Ф. Повышение содержания наполнителя привело к снижению линейной интенсивности изнашивания полимерных композитов с $18{,}3 \times 10^{-9}$ при 2,5 об. % содержания наполнителя до $2{,}6\times 10^{-9}$ при 25 об. % содержания наполнителя.

На рисунках 3-4 представлены результаты физико-механических и теплофизических испытаний полимерных композитов.

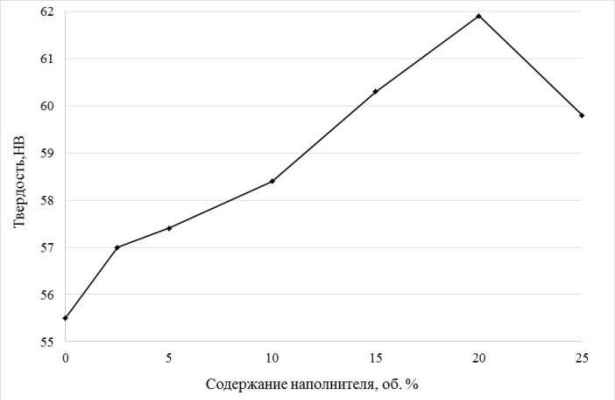


Рис. 3. **Зависимость твердости полимерных композитов от содержания Малеида Ф**

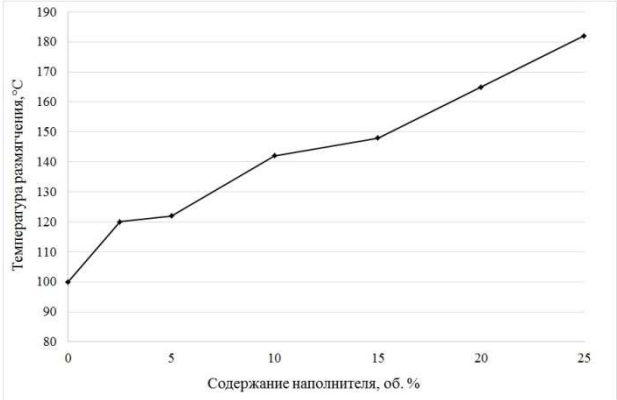


Рис. 4. **Зависимость температуры размягчения полимерных композитов от содержания Малеида Ф**

Показано, что повышение содержания наполнителя приводит к увеличению твердости полимерных композитов от 55,5 при 2,5 об. % содержания наполнителя до 61,9 при 20 об. % содержания наполнителя, дальнейшее повышение содержания наполнителя приводит к снижению твердости полимерных композитов. Видно, что повышение содержания наполнителя приводит к увеличению температуры размягчения полимерных композитов на всем исследованном диапазоне наполнения, так при 2,5 об. % содержания наполнителя температура размягчения составляла 120°С, при 25 об. % содержания наполнителя - 182°С.

Заключение

Установлено, что повышение содержания Малеида Ф приводит к увеличению коэффициента трения на 20 %, износостойкость полимерных композитов при этом

увеличилась на 604 %. Показано, что увеличение содержания наполнителя до 20 об. % приводит к повышению твердости композитов на 8,6 %, дальнейшее повышения содержания наполнителя приводит к снижению твердости полимерных композитов. Установлено, что повышение содержания наполнителя приводит к увеличению температуры размягчения композитов на 52 %.

1. Effect of the M-Phenylenediamine on the Tribotechnical and NVH Characteristics of the Frictional Composite Materials Based on PTFE / S.N. Bukharov, V.K. Merinov, V.P. Sergienko, A.Y. Grigoriev, S.S. Negmatov // Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS). – 2021. – Vol. 233. – pp. 442–449.
2. Шошева А. Л. Бисмалеинимидные связующие (обзор). Часть 1 //Труды ВИАМ. – 2022. – №. 10 (116). – С. 23-41.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОКСИДНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ZrO_2

А.Г. Киселевич, А.Р. Шклейник, Е.А. Соснов

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия; anastasia.kiselevich@yandex.ru

Введение

Известно, что химические воздействия, затрагивающие твердое тело, в первую очередь отражаются на его поверхности, что обусловлено повышенной реакционной способностью атомов поверхности. Поскольку при модифицировании материалов изменения происходят, начиная с тонкого приповерхностного слоя, важно понимать, какое именно влияние будет оказано на него, а также какие свойства объекта будут затронуты. Одним из критериев оценки изменений, протекающих на поверхности, является изменение спектральных характеристик материала. Наличие на поверхности материала нескольких разнородных атомов позволит оценить их взаимное влияние, а также оценить вклад каждого в формирование свойств. Среди методов исследования оптических свойств поверхности твердых тел перспективно использование электронной спектроскопии диффузного отражения (ЭСДО), позволяющей проводить анализ тонкого приповерхностного слоя глубиной не более 5 нм [1, 2]. Данное исследование направлено на оценку влияния вводимых в приповерхностный слой элементоксидных ($ЭО_X$) модификаторов на изменение спектральных характеристик матрицы.

Материалы и методы

В качестве матрицы использовали нестабилизированный ZrO_2 в устойчивой моноклинной модификации с полностью гидроксилированной поверхностью. Выбор обусловлен отсутствием в составе материала примесных атомов, искажающих как объемные, так и поверхностные характеристики матрицы.

Модифицирование поверхности диоксида проводили методом молекулярного наслаивания (МН) путем попеременной обработки материала парами реагента ($VOCl_3$, $TiCl_4$ и CrO_2Cl_2) и H_2O. Был осуществлен 1 цикл МН для каждого реагента.

Для оценки изменения оптических свойств материала использовали ЭСДО — метод, позволяющих выявить на поверхности носителя наличие атомов иной, по сравнению с матрицей, химической природы. Используемый метод обработки электронных спектров [3] позволяет разделить сложный спектр на составляющие, соответствующие определенному координационному полиэдру атомов в приповерхностном слое.

Результаты и их обсуждение

Методом МН были получены системы VO_X-ZrO_2, TiO_X-ZrO_2, CrO_X-ZrO_2. Мольные доли введённых модификаторов указаны в табл. 1.

Таблица 1. **Количество привитого реагента**

Модификатор	Мольная доля ЭОХ-структур,
$VOCl_3$	5,7
$TiCl_4$	1,1
CrO_2Cl_2	3,7

На рис. 1 представлены электронные спектры исходного ZrO_2 и полученных систем. В спектре исходной матрицы присутствуют две области фундаментального поглощения, которые обусловлены шириной собственной запрещенной зоны материала (5,08 эВ), а также наличием примесных уровней (4,5 – 3 эВ), сформированных дефектами в анионной подрешетке (в виде кислородных вакансий и междоузельных атомов) [4].

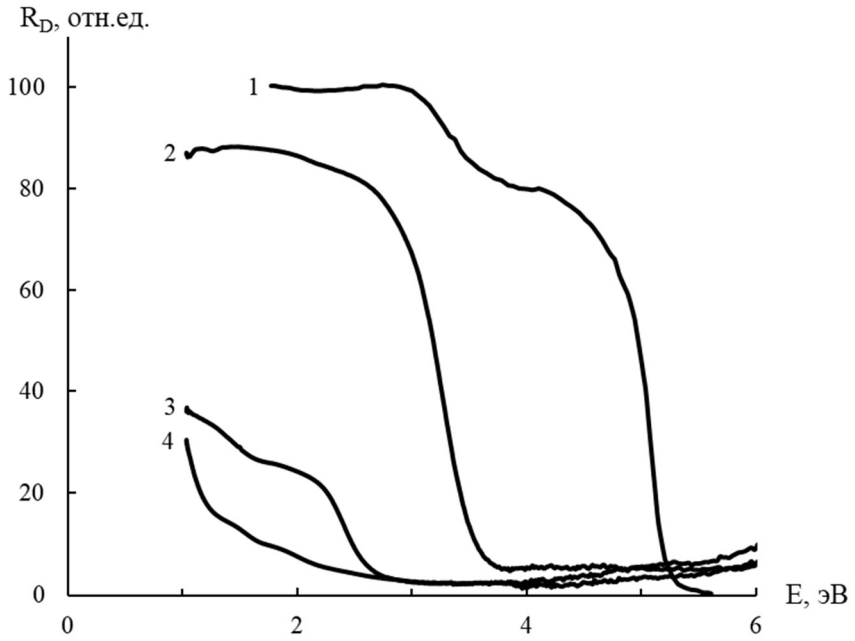


Рис. 1. **Результаты ЭСДО моноклинного ZrO_2 (1) и систем TiO_X-ZrO_2 (2), VO_X-ZrO_2 (3) и $CrOX$-ZrO_2 (4)**

В результате модифицирования поверхности $ЭO_X$-структурами край фундаментальной полосы поглощения у всех образцов сдвигается относительно характеристик матрицы в низкоэнергетическую область, причем отсутствие в спектре полос поглощения, характерных для ZrO_2, свидетельствует о полном перекрывании поверхности подложки.

Математическая обработка спектров ЭСДО [3] позволяет выделить в приповерхностной области модифицированного ZrO_2 спектральные переходы, отвечающие формированию различных элементоксидных полиэдров.

1. Крылов О. В., Киселёв В. Ф. Адсорбция и катализ на переходных металлах и оксидах. — М.: Химия. 1981.
2. Малков А. А., Кукушкина Ю. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Синтез титаноксидных наноструктур методом молекулярного наслаивания на поверхности γ-Al2O3 // Неорганические материалы. — 2020 (56), № 12, 1303—1310.
3. Соснов Е. А., Малков А. А., Малыгин А. А. Новый вариант обработки электронных спектров диффузного отражения // Журнал физической химии. — 2009 (83), № 4, 746—752.

4. Киселевич А. Г., Соснов Е. А., Белоусова О. А. и др. Строение и состав гидратированного диоксида циркония // Известия СПбГТИ(ТУ). — 2025, № 99 (73), 22—28.

Благодарности

Работа выполнена на базе Первого всероссийского инжинирингового центра технологии молекулярного наслаивания Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

ХИМИЧЕСКАЯ СБОРКА ТИТАНОКСИДНОЙ СИСТЕМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕЛЕГИРОВАННОГО ZrO_2

А.Г. Киселевич, Е.А. Соснов

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия; anastasia.kiselevich@yandex.ru

Введение

Системы на основе смешанных оксидов TiO_2/ZrO_2, HfO_2/ZrO_2 обладают более высокими диэлектрическими характеристиками, чем составляющие их чистые оксиды. Известно также применение титанатов Ba и Zr в качестве диэлектрических материалов [1]. При этом данные системы получают в основном классическими керамическими методами. Однако представляет интерес получение смешанных систем с тонким покрытием, обладающим улучшенными свойствами относительно чистого матричного оксида.

Одним из перспективных методов получения тонких покрытий является метод молекулярного наслаивания (МН). Особенностями данного метода являются: смещение химического равновесия в область полного использования реакционноспособных функциональных групп поверхности матрицы, контроль подаваемого реагента на каждой стадии синтеза (каждый цикл синтеза включает стадии хемосорбции и гидролиза с удалением после каждой из них избытка реагента и низкомолекулярных продуктов реакции), а также возможность регулировать толщину получаемого покрытия количеством проведенных циклов.

Материалы и методы

В качестве матрицы использовали нелегированный ZrO_2 моноклинной модификации (m-ZrO_2), полученный гидролизом $ZrO(NO_3)_2{\cdot}6H2O$ в аммиачном буфере [2] и прокаленный в течении 4 часов при 500°C до полной кристаллизации и удаления всех форм сорбированной и координационно-связанной воды.

Синтез титаноксидной системы (TiO_X-ZrO_2) проводили в потоке газа-носителя (N_2) на термогравиметрической установке с контролем изменения массы на каждой стадии про- цесса. Процесс осуществляли при температуре 200°C путем попеременной обработки подложки парами $TiCl_4$ и H_2O с удалением после каждой стадии избытка реагента и низкомолекулярных продуктов взаимодействия.

Для характеризации полученной системы были использованы рентгенофазовый анализ (РФА) и электронная спектроскопия диффузного отражения (ЭСДО). Метод обработки [3], используемый для оценки результатов ЭСДО, позволяет описать сложную систему, содержащую несколько типов элементоксидных полиэдров на поверхности.

Результаты и их обсуждение

Методом МН были получены образцы после 1 ($1TiO_X$-ZrO_2) и 4 ($4TiO_X$-ZrO_2) циклов нанесения покрытия; в результате синтеза на поверхности матрицы привито 1,1 и 3,7 мол. %

титаноксидного покрытия, соответственно. Нанесенное титаноксидное покрытие рентгеноаморфно, однако после кратковременного температурного воздействия (нагрев до 1600°С) на дифрактограмме системы $4TiO_X$-ZrO_2 кроме пиков, характерных для m-ZrO_2, появляются пики, отвечающие орторомбическому $TiZrO_4$ (рис. 1). В системе $1TiO_X$-ZrO_2 аналогичного фазообразования не наблюдается.

Результаты математической обработки электронных спектров систем $1TiO_X$-ZrO_2 и $4TiO_X$-ZrO_2 после термообработки (рис. 2) выявили наличие в спектрах обоих материалов двух областей поглощения в областях 2,8 и 3,3 эВ. При этом полоса фундаментального поглощения в области 2,8 эВ соответствует наличию полиэдров, характерных для цирконата титана, что подтверждает образование $TiZrO_4$ в тонком приповерхностном слое. Учитывая, что соотношение Ti : Zr в составе $TiZrO_4$ составляет 1 : 1, а толщина формируемого в результате 4 циклов МН титаноксидного покрытия не превосходит 1 нм [4], можно предположить, что толщина возникающего при термообработке вследствие термической диффузии атомов Zr и Ti слоя $TiZrO_4$ не превосходит 2 нм. При этом в спектрах ЭСДО отсутствуют полосы поглощения, характерные для m-ZrO_2 [2], что свидетельствует о полном перекрывании поверхности титаноксидным слоем.

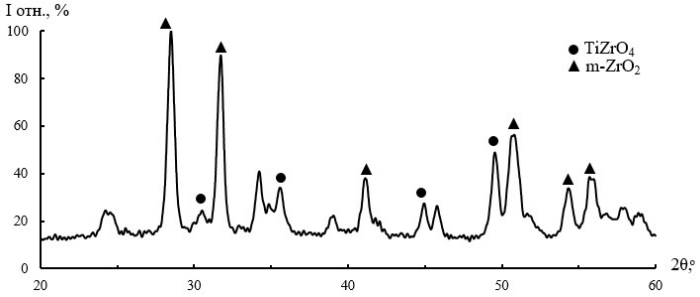


Рис. 1. **Дифрактограмма системы $4TiO_X$-ZrO_2 после термообработки**

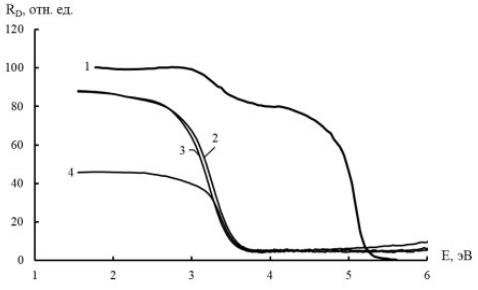


Рис. 2. **Спектры ЭСДО моноклинного ZrO_2 (1) и систем $1TiO_X$-ZrO_2 (2), $4TiO_X$-ZrO_2 (3) и $4TiO_X$-ZrO_2 после термообработки (4)**

Таким образом, формирование после термической обработки материалов с конформным титаноксидным нанопокрытием, полученным по технологии МН, наноразмерного слоя $TiZrO_4$ позволяет рассматривать систему TiO_X-ZrO_2 в качестве перспективного материала для создания на основе моноклинного ZrO_2 систем типа «ядро – оболочка» с повышенными диэлектрическими характеристиками.

Благодарности

Работа выполнена на базе Первого всероссийского инжинирингового центра технологии молекулярного наслаивания Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

1. Kim T., Oh J., Park B., Hong K. Dielectric properties and strein analysis in paraelectric $ZrTiO_4$ thin films deposited by DC magnetron sputtering // Jpn. J. Appl. Phys. — 2000 (39), 4153—4157.
2. Киселевич А. Г., Соснов Е. А., Белоусова О. А. и др. Строение и состав гидратированного диоксида циркония // Известия СПбГТИ(ТУ). — 2025, № 99 (73), 22—28.
3. Соснов Е. А., Малков А. А., Малыгин А.А. Новый вариант обработки электронных спектров диффузного отражения // Журнал физической химии — 2009 (83), № 4, 746—752.
4. Малков А. А., Кукушкина Ю. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Синтез титаноксидных наноструктур методом молекулярного наслаивания поверхности у-Al_2O_3 // Неорганические материалы — 2020 (56), № 12, 1303—1310.

ИССЛЕДОВАТЬ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ МЕДИ НА СТАЛЬНОЙ ОСНОВЕ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ СЛОЯ И НАНЕСЕННОГО НА СТАЛЬНОЙ ДИСК ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

М.В. Лазарчик, А.Н. Роговой, П.Н. Криволапов, А.И. Шевцов

Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа»

Объектом исследований является фрикционный материал с промежуточным гальваническим слоем меди на стальной основе.

Цель работы – повышение адгезионной прочности гальванического слоя меди фрикционного материала на стальной основе фрикционного диска энергонагруженных узлов трения.

В настоящее время обеспечение стабильной и высокой адгезионной прочности гальванической меди на стальной основе остаётся одной из ключевых задач при разработке энергонагруженных фрикционных узлов. Практические ограничения связаны с явлениями контактного вытеснения при прямом меднении, влиянием технологической подготовки поверхности и необходимостью применения промежуточных подслоёв для надёжного сцепления. Значительную роль играют режимы электролитического осаждения и состав электролита, определяющие микроструктуру и внутренние напряжения медного слоя.

Современные подходы к решению проблемы включают оптимизацию состава электролитов и режимов осаждения, а также комплексную подготовку поверхности несущей основы и рабочего фрикционного слоя.

В работе установлено влияние толщины слоя меди на его адгезионную прочность с оценкой перспектив увеличения прочности сцепления при возрастании толщины. Это актуально для использования слоя меди как адгезива и демпфера для ограничения эффекта динамических нагрузок в энергонагруженных фрикционных узлах.

Исследования прочности сцепления гальванической меди выполнены с применением методики его разрушения сеткой царапин (ГОСТ 9.916 [1], ГОСТ 31149 [2]). Оценка адгезионной прочности, нанесенного через промежуточный слой меди фрикционного материала, проводилась при его разрушении при изгибе несущей стальной основы.

Несущая основа диска изготовлена из стали 65Г, легированной марганцем. Рабочий слой фрикционного материала нанесен на гальваническую медь с применением свободной насыпки порошковой композиции и последующего ее спекания под давлением.

По результатам исследований установлено, что при изменении толщины гальванической меди значимыми факторами влияния на ее прочность сцепления с несущей основой являются легирующие элементы основы диска и рабочего слоя фрикционного материала, а также остаточные напряжения гальванической меди. Проанализирован механизм влияния упомянутых факторов с разработкой схемы процессов влияния.

Результаты исследований влияния толщины гальванического слоя на его адгезионную прочность на несущей основе фрикционного диска приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, с увеличением толщины гальванической меди ее адгезионная прочность на стальной несущей основе возрастает. При этом наблюдается в определенной степени стабилизация прочности сцепления при увеличении толщины от12 до 15 мкм, что, очевидно, указывает на ее оптимизацию.

Таблица 1. **Результаты исследований адгезионной прочности**

Толщина слоя меди, мкм	Площадь отслоений меди после разрушения сеткой царапин, мм^2	Относительная площадь отслоений меди на участке выборки, %
6	4,05	18,14
9	3,41	15,27
12	2,35	10,53
15	1,92	8,61
Примечание – Площадь участка выборки (детектирования) составляет 22,323 мм^2 и соответствует площади сетки царапин при разрушении гальванического слоя меди.		

Полученные результаты объясняются влиянием остаточных (внутренних) напряжений гальванической меди и блокировкой диффузионных процессов оксидами на границе медь-стальная основа образца фрикционного диска. Значимость остаточных напряжений обусловлена факторами искажения кристаллической структуры гальванического слоя.

1. ГОСТ 9.916-2023 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. – Минск: Госстандарт, 2024. – 98 с.
2. ГОСТ 31149-2014. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза. – Минск: Госстандарт, 2016. – 18 с.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 3D-ПЕЧАТНЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ГИБРИДНЫМ УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ (УНТ/ГРАФЕН)

И. Д. Парфимович[1], Ф. Ф. Комаров[1], В. В. Пилько(мл.)[1], И. В. Чижов[2]

[1]Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь; idparfimovich@gmail.com

[2]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Цель

Целью работы являлось установление закономерностей влияния концентрации многослойных углеродных нанотрубок (УНТ) марки «Таунит-МД» на коэффициент трения и износостойкость 3D-печатных фотополимерных композитов на основе смолы Kingroon 3D Printing UV Sensitive Resin Basic, а также оценка эффективности гибридного наполнения композитов УНТ и графеном по сравнению с композитами, содержащими только УНТ.

Материалы и методы

Исследованы четыре состава: немодифицированная смола (контрольный образец), композиты с 0,5 и 1,0 масс. % УНТ и гибридный состав (0,5 масс. % УНТ + 0,5 масс. % графена). Образцы изготавливались методом 3D-печати на принтере Anycubic Photon S. Испытания на трение и износ проводились в геометрии «диск–плоскость» (контртело – диск из стали 12Х18Н9Т диаметром 30 мм) при нормальной нагрузке 200 мН и линейной скорости скольжения 3,1 см/с; дистанция скольжения составляла D = 10,3 м. Коэффициент трения регистрировался тензометрическим датчиком при помощи ПО Tribology Logger 2013. Геометрические параметры лунок износа определялись методом оптической микроскопии, элементный состав поверхности – методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС).

Результаты и их обсуждение

В литературе показано, что трибологические характеристики полимерных композитов существенно зависят от содержания и диспергирования углеродных нанонаполнителей, а также от структуры полимерной матрицы [1–4]. В настоящей работе зависимость трибомеханических параметров от концентрации УНТ носит немонотонный характер. Введение 0,5 масс. % УНТ снижает относительный коэффициент трения на 11,6 % и повышает износостойкость на 42,8 % по сравнению с контрольным образцом. При увеличении содержания УНТ до 1,0 масс. % коэффициент трения, напротив, возрастает на 20,4 %, а износостойкость увеличивается на 7,6 %. Кинетика относительного коэффициента трения исследованных составов представлена на рис. 1.

Наилучшее сочетание показателей демонстрирует образец гибридного состава: коэффициент трения снижается на 13,0 %, износостойкость возрастает на 49,5 %. Поскольку образец, содержащий только графен, в данной серии не исследовался, количественно разделить вклад графена и УНТ и сделать вывод об аддитивности их эффектов невозможно. Вместе с тем более высокие показатели гибридного состава по сравнению с контрольным образцом и композитами, содержащими только УНТ, указывают на эффективность совместного введения двух типов углеродного наполнителя. Положительное влияние графенсодержащих наполнителей на фрикционные характеристики 3D-печатных фотополимерных композитов и гибридных систем отмечено также в работах [5, 6]. Возможное объяснение полученного эффекта связано с тем, что графен может способствовать сглаживанию микронеровностей и формированию более стабильной контактной поверхности, тогда как УНТ обеспечивают армирование объёма и могут участвовать в формировании трибоплёнки [1, 5, 6].

По данным ЭДС, ухудшение трибомеханических характеристик образца при содержании УНТ в композите на уровне 1,0 масс. % не связано с дефицитом углерода на поверхности – его содержание возрастает с 63,07 до 65,57 ат.%. Наиболее вероятной причиной такой деградации может быть агломерация нанотрубок при повышении их концентрации выше диапазона равномерного диспергирования около 0,5 масс. %; в этом случае агломераты могут увеличивать сопротивление сдвигу и нарушать формирование равномерного самосмазывающего слоя. Такое объяснение согласуется с литературными данными о влиянии концентрации и диспергирования УНТ на трибологические свойства полимерных композитов [1–3].

Таким образом, для антифрикционных применений 3D-печатных фотополимерных композитов наиболее перспективным способом модифицирования состава с точки зрения оптимизации основных трибомеханических параметров является не максимизация содержания УНТ, а гибридное наполнение умеренным количеством УНТ (0,5 масс.%) в сочетании с графеном (0,5 масс.%), обеспечивающее наилучший баланс между снижением относительного коэффициента трения и повышением износостойкости.

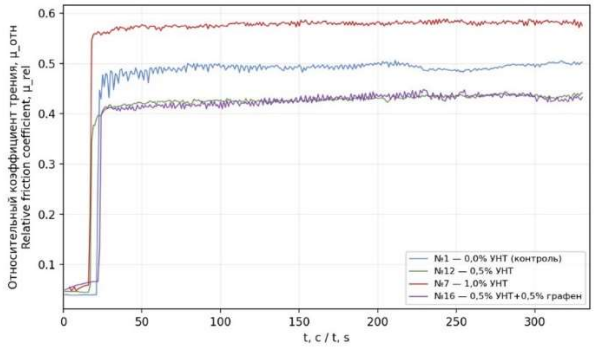


Рис. 1. **Кинетика относительного коэффициента трения исследованных образцов**

1. Zhang C. et al. Tribological Properties of Blocky Composites with Carbon Nanotubes: a review // International Journal of Molecular Sciences. — 2024. — Vol. 25, № 7. — Art. 3938.
2. Patel V., Joshi U., Joshi A. et al. Multi-Walled Carbon-Nanotube-Reinforced PMMA Nanocomposites: An Experimental Study of Their Friction and Wear Properties // Polymers. — 2023. — Vol. 15, № 13. — Art. 2785.
3. Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О. и др. Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2017. — Т. 60, вып. 9. — С. 45–51.
4. Панин С.В., Корниенко Л.А., Нгуен Суан Т. и др. Износостойкость композитов на гибридной матрице СВМПЭ-ПТФЭ: механические и триботехнические свойства матрицы // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 3. — С. 325–333.
5. Hanon, M. M. Tribological characteristics of digital light processing (DLP) 3D printed graphene/resin composite: influence of graphene presence and process settings / M. M. Hanon, A. Ghaly, L. Zsidai, S. Klébert // Materials & Design. – 2022. – Vol. 218. – Art. 110718. – DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110718
6. Keshavamurthy, R. High-performance SLA-printed UV resin composites reinforced with h-BN/graphene for enhanced frictional stability and wear resistance / R. Keshavamurthy [et al.] // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2026. – Vol. 12. – Art. 130. – DOI: 10.1007/s40735-026-01186-x

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. Пилипчук, О.Ю. Комякевич

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; p.ili.p@yandex.ru

Цель

Оценка возможности определения несущей способности смазочных материалов по толщине смазочной пленки.

Методы исследований

Нагрузочная способность смазочных материалов во многом определяет ресурс тяжелонагруженных узлов трения, который, в свою очередь, существенно зависит как от отношения λ толщины смазочной пленки h к средней шероховатости контактирующих поверхностей ($\lambda = h / \sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}$, где R_{a_1} и R_{a_2} – шероховатости контактирующих поверхностей), для которого, в определенной мере, характерна зависимость относительного изменения долговечности n от λ, показанная на рис. 1 [1], так и от свойств смазочного материала.

Ассортимент смазочных материалов постоянно расширяется, поэтому потребность в оценке их основных характеристик ускоренными методами постоянно растет.

К одному из наиболее распространенных методов определения основных характеристик смазочных материалов можно отнести определение их основных трибологических свойств, включая несущую способность, предельную нагрузочную способность, противоизносные и противозадирные свойства на четырехшариковой машине согласно [2].

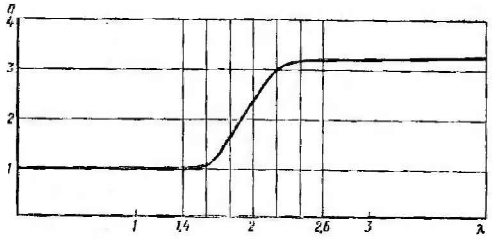


Рис. 1. **Влияние параметра λ на относительное изменение долговечности *n* подшипников качения [1]**

Как правило, определение приведенных выше характеристик по этой методике, в особенности несущей способности по критической нагрузке $P_к$, можно отнести к одному из наиболее длительных и трудоемких из приведенных выше процессов. Вместе с тем, возникновение износа при отсутствии в смазочном материале абразивных частиц в основном происходит при граничном трении, т.е. $\lambda \approx 1{,}4\ldots1{,}6$. При этом значительная часть жидких масел является неполярными диэлектриками с ионной проводимостью [3]. С учетом этого можно предположить, что проводимость возникает при граничном или близком к нему трении. Тогда определение нагрузки, при которой возникает это состояние, позволит существенно ускорить и упростить определение $P_к$ и реализовать процесс экспресс-анализа этой характеристики.

Для проведения исследований использовалось специальное приспособление (рис. 2) в комплекте с мультиметром TEK DT9205A, микромиллиомметром ИКС-1А и микрометром ЗУБР (диапазон 50-75 мм, шаг измерения 0,001 мм). Методика исследований включала следующее:

– в качестве контактирующих элементов использовались подшипниковый шарик, выполненный из стали ШХ15, и плоская пластина, выполненная из стали Ст20, которые предварительно протирались, обезжиривались ацетоном и спиртом и подвергались сушке в течение 20 минут при комнатной температуре;



Рис. 2. **Комплект средств для проведения**

– для контроля контакта и зазора в зоне взаимодействия шарика с пластиной использовался микрометр ЗУБР с микрометрическим винтом и электронным измерительным датчиком перемещения с ценой деления 1 мкм;

– для определения точки контакта шарика и пластины использовался мультиметр TEK DT9205A, настроенный на режим измерения сопротивления;

– шарик постепенно вводился в контакт с пластиной при помощи микрометрического винта и, после начального контакта, создавался натяг в сопряжении, соответствующий 20 мкм показаний микрометра, после чего производились измерения сопротивления, при которых натяг уменьшался с шагом, *исследований*соответствующим 2 мкм показаний микрометра, до разрыва электрической цепи, причем исследования проводились также при сухом контакте и наличии между шариком и пластиной масла Индустриальное-40.

Результаты и их обсуждение

Анализ изменения сопротивления R контакта шарика с пластиной при отсутствии между ними масла и с маслом в зоне граничного трения показал, что при создании в контакте микрометром определенной нагрузки, сопротивление «сухого» контакта существенно отлично от контакта с масляной пленкой. При этом разница между этими сопротивлениями растет по мере уменьшения нагрузки. При появлении в контакте зазора в обоих случаях в измерительном тракте возникает разрыв, т.е. сопротивление стремится к бесконечности.

Таким образом, при испытаниях смазочного материала на четырехшариковой машине в режиме постоянно увеличивающейся нагрузки, анализ градиента изменения сопротивления

контакта верхнего и нижних шариков может быть использован для определения нагрузки, при которой возникает граничное трение. Варьированием соседними нагрузками согласно ГОСТ 9490 длительность определения критической нагрузки может быть уменьшена на порядок и более. Кроме того, расширенный анализ характера изменения сопротивления смазочной пленки в этой зоне позволит существенно повысить информативность результатов испытаний.

Осуществление экспресс-анализа нагрузочной способности смазочного материала, при реализации приведенного выше подхода, может быть выполнено путем монотонного увеличения нагрузки с одновременным контролем электрического сопротивления зоны контакта шариков, включающей смазочную пленку. При появлении электрического сопротивления фиксируется соответствующая ему нагрузка и дальнейшие испытания осуществляются по методике ГОСТ 9490. Это позволяет существенно повысить информативность проведения испытаний при значительном уменьшении их длительности.

1. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение – 1979. – 358 с.
2. ГОСТ 9490-75. Межгосударственный стандарт. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. – 8 с.
3. Изместьев, И.В. Поляризация и электропроводность некоторых моторных масел как дисперсных систем//И.В. Изместьев, О.А. Кожевникова – Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – Вып 1(32). – 2016. – С.44-50.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ БОРИРОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕЛЬХОЗМАШИН ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АГРАРНЫХ РЕГИОНАХ С УМЕРЕННЫМ КЛИМАТОМ

Чернецкий С.И., Петришин Г.В., Невзоров М.В.

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого Гомель, Беларусь

Введение

Режущие элементы сельскохозяйственной техники — такие как ножи соломоизмельчителей, почвообрабатывающие лапы и ножи косилок — подвергаются интенсивному абразивному износу в условиях высокой загрязнённости минеральными частицами, фитолитами и растительными остатками. Особенно актуальна эта проблема в зонах интенсивного земледелия средней полосы, где продолжительность уборочной кампании, влажность соломы и степень засорённости создают повышенные нагрузки на оборудование.

Сталь 65Г, широко используемая для изготовления таких деталей, обладает достаточной прочностью, однако её износостойкость в реальных условиях оказывается недостаточной. Одним из эффективных и технологически доступных способов повышения долговечности является борирование — процесс диффузионного насыщения поверхности бором с образованием твёрдых боридных фаз FeB и Fe_2B, характеризующихся высокой твёрдостью (до 1800–2000 HV) и сопротивлением абразивному износу.

Выбор оптимальных режимов борирования требует тщательного баланса между глубиной проникновения легирующего элемента, уровнем твёрдости и сохранением вязкости основного металла. Слишком высокие температуры или чрезмерная длительность выдержки могут привести к чрезмерному росту зерна, хрупкости и склонности к сколам, что делает деталь непригодной к эксплуатации.

Целью настоящего исследования является оптимизация режимов борирования режущих элементов из стали 65Г для условий эксплуатации в средней полосе с учётом реальных нагрузок, доступности оборудования и экономической целесообразности.

Объект исследования

Объектом исследования являются режущие ножи из стали 65Г, применяемые в соломоизмельчителях зерноуборочных комбайнов. Химический состав соответствует требованиям ГОСТ 14959-79 и включает углерод в количестве 0,62–0,70 %, марганец — 0,90–1,20 %, кремний — 0,17–0,37 %, а также допустимые примеси серы и фосфора.

Цель исследования

Целью работы является определение оптимальных температурно-временных режимов борирования, обеспечивающих максимальную износостойкость при сохранении механической прочности и технологичности процесса для условий серийного и ремонтного производства.

Методология

Борирование проводилось в порошковой насыщающей среде, состоящей из буры, карбида бора, карбида кремния и активатора. Обработка осуществлялась в герметичных стальных контейнерах, помещённых в муфельную печь. Исследовались восемь режимов, варьирующих температуру (900, 950 и 1000 °C) и время выдержки (4, 6 и 8 часов). После обработки все образцы подвергались низкотемпературному отпуску при 300 °C в течение двух часов для снижения внутренних напряжений и повышения адгезии покрытия.

Для оценки качества упрочнения применялись следующие методы:

– Микротвёрдость по Виккерсу (HV) с нагрузкой 100 г;

–Металлографический анализ толщины и структуры диффузионного слоя на микроскопе МИМ-8;

–Лабораторные испытания на абразивный износ по методу пятого (ГОСТ 23.208-79);

–Полевые испытания в условиях уборки пшеницы (влажность 14–16 %, засорённость соломы — до 3 % минеральных включений).

Каждый режим испытывался на пяти образцах, результаты усреднены.

Результаты и обсуждение

Анализ параметров диффузионного слоя показал, что толщина и твёрдость закономерно возрастают с увеличением температуры и времени обработки. Однако при температуре 1000 °C наблюдались признаки перегрева: снижение пластичности и единичные случаи сколов при механических нагрузках.

Наилучшие результаты были получены при обработке при 950 °C в течение 6 часов. Этот режим обеспечил равномерный диффузионный слой толщиной 85 мкм, микротвёрдость 1680 HV и минимальный удельный износ — 6,1 мг/км.

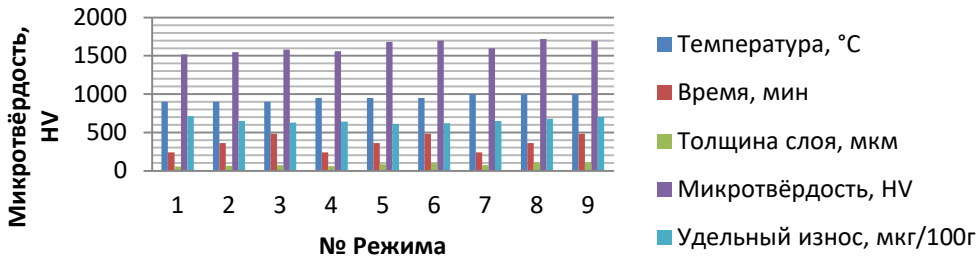


Рис. 1. **Удельный износ при различных режимах борирования**

Примечание: при режиме 8 (1000 °C, 6 ч) наблюдалось отслоение покрытия при ударных нагрузках. Лабораторные испытания подтвердили, что режим №5 обеспечивает наименьший износ. На рисунке 1 представлено графическое сравнение удельного износа по всем режимам.

Полевые испытания показали, что базовые (неупрочнённые) ножи достигают предельной ширины затупления 0,7 мм за 70 часов работы. Ножи, обработанные по оптимальному режиму, сохраняли работоспособность до 148 часов, что соответствует увеличению ресурса в 1,2 раза.

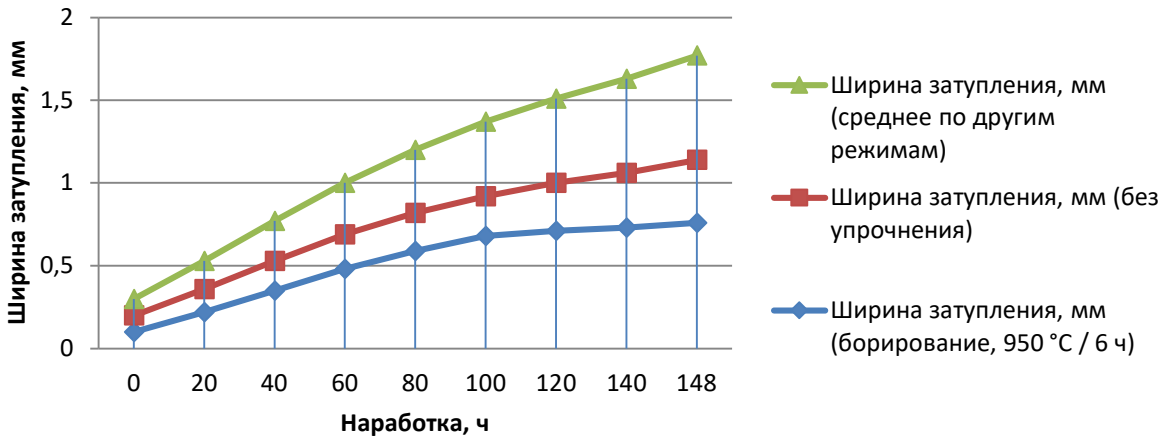


Рис. 2. **Динамика затупления ножей в полевых условиях**

Заключение

Оптимальным режимом борирования режущих элементов из стали 65Г для условий средней полосы признан режим при температуре 950 °C с выдержкой 6 часов. Он обеспечивает наилучшее сочетание толщины диффузионного слоя, высокой твёрдости и отсутствия хрупкости. Полевые испытания подтвердили увеличение ресурса в 1,2 раза, а технологическая реализуемость позволяет внедрять процесс на предприятиях без дорогостоящего оборудования. Рекомендуется использовать данный режим в технологических картах упрочнения деталей сельхозтехники.

1. Лахтин Ю.М., Арзамасцева В.П. Химико-термическая обработка металлов. — М.: МИСиС, 2005. — 480 с.
2. Гулый В.Н. Износ деталей сельскохозяйственных машин. — М.: Колос, 2001. — 320 с.
3. Филиппов М.А., Кузьмин А.В. Борирование инструментальных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2017. — № 3. — С. 30–34.
4. Костычев К.И. и др. Повышение износостойкости ножей соломоизмельчителя // Техника в сельском хозяйстве. — 2020. — № 3. — С. 12–15.
5. ГОСТ 23.208-79. Методы испытаний на износ при трении. — Введ. 1980-01-01.
6. Белкин П.Н. Технологии упрочнения деталей сельхозмашин. — Ростов н/Д: Феникс, 2017. — 256 с.
7. Панфилов С.А. Диффузионное легирование в производстве деталей сельхозтехники // Вестник машиностроения. — 2018. — № 5. — С. 56–60.
8. Чернецкий, С. И. Новые электродные материалы на основе диффузионно-борированной стали для электроискрового упрочнения деталей сельскохозяйственной техники / С. И. Чернецкий, Г. В. Петришин // Инновации в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 2025 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 258–261.

СМАЧИВАЕМОСТЬ ЛЕНГМЮРА – БЛОДЖЕТТ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛА И ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

М.Д. Шрубок, Д.В. Сапсалёв, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
mihailshrubok@yandex.by

Введение

Актуальность исследования смесей полимеров обусловлена возможностью создания принципиально новых гибридных нанокомпозитов, которые превосходят по свойствам индивидуальные полимеры. Ряд физико-химических характеристик определяют эксплуатационные свойства материала. Так, смачиваемость покрытий на основе полимеров оказывает влияние на комплекс их характеристик, например, биоактивность, барьерные и адгезионные свойства [1,2].

Формирование покрытий нанометровой толщины на основе смесей полимеров с различным соотношением компонентов позволяет управлять их гидрофобно-гидрофильными свойствами [3,4] за счет протекающего процесса фазового разделения, сопровождающегося пространственным перераспределением компонентов, изменением плотности упаковки и пористости покрытий, что определяет смачиваемость их поверхности.

Цель – формирование пленок Ленгмюра – Блоджетт на основе смесей полимеров поливинилкарбазола (ПВК) и полиметилметакрилата (ПММА) и изучение их гидрофильных свойств.

Материалы и методы

Формирование монослойных полимерных покрытий ПВК (Sigma Aldrich, 1100000), ПММА (Sigma Aldrich, 15000) и смесей ПВК-ПММА осуществляли методом Ленгмюра – Блоджетт при поверхностном давлении (π) 15 мН/м на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин.

Полимерные пленки ПВК-ПММА сформированы из растворов с различным количественным соотношением компонентов, полученных путем смешения растворов ПВК (c = 0,75 мг/мл) и ПММА (c = 1 мг/мл) в хлороформе и последующей обработке ультразвуком.

Гидрофильные свойства покрытий ПВК-ПММА оценивали на установке DSA 100E (Krüss, Германия), рабочие жидкости – дистиллированная вода, дийодметан, объем капли – 2 мкл. Краевой угол смачивания определяли методом «лежащей» капли. Удельную поверхностную энергию рассчитывали по модели Оуэнса – Вендта – Рабеля – Кьельбе.

Результаты и обсуждение

Значения краевого угла смачивания пленок ПВК и ПММА составили 74,31º ± 1,21º и 53,97º ± 1,33º, что обусловлено различием структуры их макромолекул. Макромолекулы ПВК и ПММА представлены поливинильными цепями с карбазольными и ацетатными боковыми группами соответственно. Наличие объемных карбазольных групп обеспечивает гидрофобность ПВК. Ацетатные группы ПММА способствуют лучшей смачиваемости поверхности пленок. Полярная составляющая удельной поверхностной энергии для ПММА (21,03 мДж/м^2) выше, чем ПВК (6,81 мДж/м^2). Значения удельной поверхностной энергии пленок, массовая доля ПВК в которых составляет 7,7 %, 24,3 %, 42,9 % и 63,6 %, не зависят от содержания ПВК и ПММА в смесях полимеров. Значения краевого угла смачивания и полярной составляющей для пленок, содержащих от 7,7 % до 63,6 % ПВК, близки к ПММА (рис. 1а) и определяются данным компонентом.

В случае образца, содержащего 87,1 % ПВК, установлено уменьшение значений удельной поверхностной энергии за счет увеличения дисперсионной составляющей и увеличение КУС

до значений, близких к ПВК (рис. 1). Рост краевого угла смачивания (от 74,31º ± 1,21º до 80,11º ± 1,55º) при введении небольших количеств ПММА (12,9 %) в ПВК обусловлен повышением плотности упаковки пленки за счет внедрения ПММА в межмолекулярное пространство ПВК.

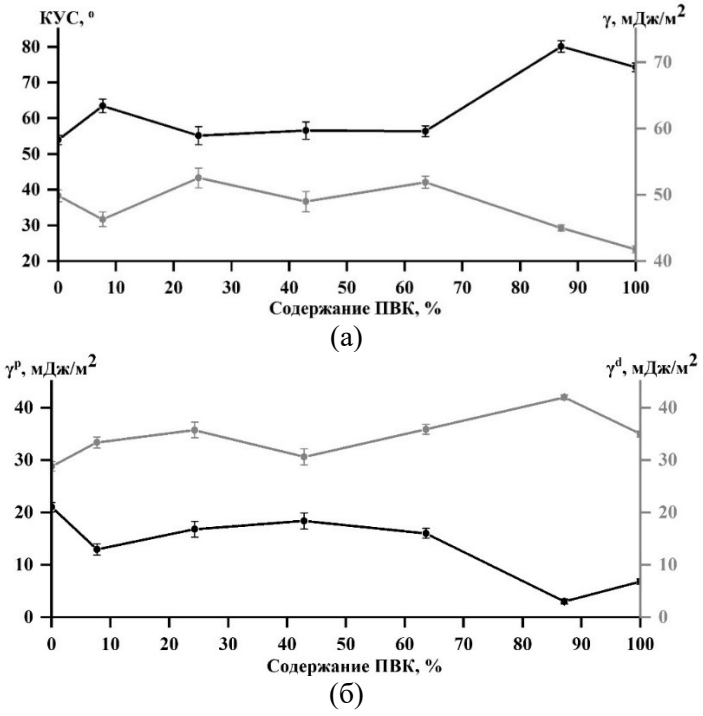


Рис. 1. **Изменение краевого угла смачивания и удельной поверхностной энергии ЛБ-пленок на основе ПВК-ПММА (а); изменение полярной и дисперсной составляющей удельной поверхностной энергии ЛБ-пленок на основе ПВК-ПММА (б)**

Заключение

На основании проведенного исследования показано, что смачиваемость покрытий на основе смесей ПВК-ПММА главным образом определяется преобладающим компонентом. Введение небольших количеств ПММА в ПВК (содержание ПВК 87,1 %) приводит к росту краевого угла смачивания покрытия (от 74,31º ± 1,21º до 80,11º ± 1,55º) за счет внедрения ПММА в межмолекулярное пространство ПВК.

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР 1 задания 7.2.2. «Наноинженерия поверхности для точной механики, микроэлектроники и сенсорики», подпрограммы 7.2 «Наноматериалы, наноструктуры и технологии», ГПНИ 7 «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии» на 2026–2030 годы.

1. Eranda D., Chaijan M., Castro-Muñoz R. Current advances in surface wettability in food packaging materials: Strategies, methods and future trends // Journal of Food Engineering. — 2025 (**391**) — 12440.
2. Oluwole O., Olushola O., Omolola O., Ojo O., Nnabuike O., Oluwagbenga A., Olajesu O. Recent Trends in the Application of Polymer-Based Biomaterials in Advancing Regenerative Medicine: A Review of Critical Roles // Next Research. — 2026 (**7**) — 101500.
3. Weng Q.-H., Hu M.-H., Wang J.-F., Hu J.-J. Enhancing the Flexibility and Hydrophilicity of PLA via Polymer Blends: Electrospinning vs. Solvent Casting // Polymers. — 2025 (**17**) — 800.
4. Mohamadzade S., Safavi-Mirmahalleh S.-A., Roghani-Mamaqani H., Salami-Kalajahi M. Application of cellulose/poly(vinylidene fluoride) blend films as polymer electrolytes in lithium ion batteries / S. Mohamadzade // Heliyon. — 2025 (**11**) — e42546.

АМИДЫ ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ДОБАВОК

Ю.М. Юркова[1,2], Ф.А. Григорьев[1]

[1]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь; yu.m.yurkova@gmail.com

[2]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение

Современные экологические требования стимулируют создание смазочных материалов из возобновляемого сырья. Растительные масла в данном случае, являются перспективной альтернативой минеральным, однако они уступают им по термоокислительной стабильности и низкотемпературным свойствам [1,2]. Для решения этой проблемы используют добавки или химическую модификацию. Последняя широко применяется для получения ПАВ, компонентов биодизеля и модификаторов лакокрасочных материалов [3,4], а также антиокислительных, антикоррозионных и антифрикционных присадок [5]. В данной работе исследовано влияние амидов жирных кислот растительных масел на противоизносные свойства индустриального масла на основе растительного сырья. Поскольку азотсодержащие соединения обладают высокой антикоррозионной эффективностью [5], аминолиз триглицеридов является перспективным методом синтеза многофункциональных присадок.

Цель

Изучение влияния добавок на основе амидов жирных кислот растительных масел на противоизносные свойства экологического индустриального масла.

Материалы и методы экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования было использовано индустриальное масло на основе растительного сырья «БИО-ГрОИЛ» (ТУ BY 400084698.327–2023), представляющего собой смесь рапсового технического, касторового технического и льняного пищевого масел.

Амиды жирных кислот технического качества были получены ранее из рапсового, касторового, льняного и индустриального масла на основе растительного сырья согласно методике, основанной на результатах работы [6].

Диаметр пятна износа (показатель износа) полученных смазочных материалов определяли на четырёхшариковой машине трения «ЧШМ-К1» (Технопромкомплект ЛТД, Украина) при осевой нагрузке 40 кгс и времени испытания 60 минут по ГОСТ 9490-75.

Результаты и их обсуждение

Амидирование проводили в отношении следующих масел: рапсовое техническое (образец 1), касторовое техническое (образец 2), льняное пищевое (образец 3), индустриальное (образец 4). Для оценки возможности использования амидов жирных кислот в качестве противоизносных добавок были использованы 10 масс. % растворы в базовом масле (БИО-ГрОИЛ).

Экспериментальные данные, представленные на рис.1 выявили неоднозначное влияние синтезированных добавок на смазочную способность исследуемых композиций.

Базовое индустриальное масло «БИО-ГрОИЛ» характеризуется показателем износа на уровне 0,68 мм. Введение в него 10 масс. % амидов касторового масла (образец 2) привело к снижению диаметра пятна износа на 9 %, что указывает на его перспективность в качестве противоизносной присадки. Данный эффект обусловлен специфическим строением рицинолевой кислоты, содержащей полярную гидроксильную группу, которая в совокупности с замещенными амидными группами существенно увеличивает адгезию, сплошность и прочность формируемых граничных смазочных слоев.

При исследовании образцов 1,3 и 4 отмечено увеличение диаметра пятна износа на 16-54%. Наблюдаемое ухудшение триботехнических характеристик может быть объяснено действием двух основных факторов. Во-первых, одним из механизмов может являться трибохимическое воздействие. В условиях высоких локальных температур и давлений в зоне контакта амиды жирных кислот, являясь поверхностно-активными веществами (ПАВ), подвергаются термическому разложению и вступают в реакцию с ювенильными поверхностями сопрягаемых деталей.

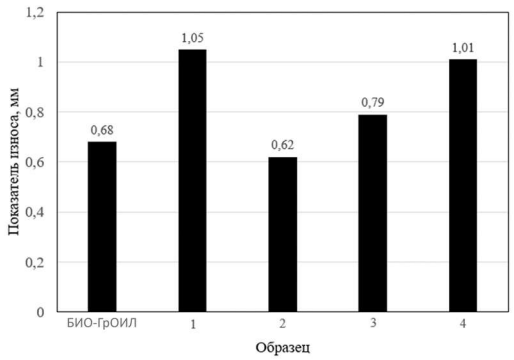


Рис.1. **Показатели износа исследуемых образов масел**

Продукты их деструкции образуют твердые соединения, интенсифицирующие абразивное изнашивание. Во-вторых, высокая концентрация присадки образует на поверхностях трения граничный смазочный слой, вытесняющий более прочные молекулярные слои, образованные растительными маслами, входящих в состав индустриального масла «БИО-ГрОИЛ». Таким образом, можно предположить, что оптимизация концентрации данных азотсодержащих добавок в образцах 1, 3 и 4 позволит минимизировать их негативное трибохимическое влияние, снизив показатель износа до уровня базового масла и, возможно, ниже.

Выводы

Установлено избирательное действие амидов жирных кислот различного происхождения на противоизносные свойства базового индустриального масла на основе растительного сырья «БИО-ГрОИЛ». Отмечена перспективность использования амидов касторового технического масла в качестве противоизносной добавки к смазочным материалам на основе растительного сырья. Введение амидов льняного пищевого, рапсового технического и смеси масел приводит к ухудшению показателя износа. Однако полученные результаты формируют открытый научно-практический вопрос, требующий проведения более детальных испытаний в расширенном диапазоне концентраций азотсодержащих добавок.

Благодарности

Работа выполнена частично в рамках задания 4.2.1 подпрограммы 7.4 «Порошковые и композиционные материалы» ГПНИ 7 на 2026–2030 годы, а также Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий (проект T25BA-005).

1. Campanella A. [et al.] Lubricants for chemically modified vegetable oils // Bioresource technology — 2010 (101), 245—254.
2. Salimon J. and Salih N. Chemical Modification of Oleic Acid Oil for Biolubricant Industrial Applications // Aust. J. Basic Appl. Sci. — 2010, 4 (7) — 1999—2003.
3. А. Антонова [и др.] Получение и свойства этиловых эфиров рапсового масла // Вестник БГУ. Химия — 2015, Сер. 2, № 1 — 7—12.

4. Гринева А. А. Эфиры этиленгликоля и жирных кислот растительных масел // Вестник ВГУ. Химия, биоло-гия, фармация — 2014, № 3 — 18—23.
5. Сафронов О. И. [и др.] Применение амидаминов растительных масел в качестве присадок к смазочным ма-териалам // Вестник ОНУ. Химия — 2018 (23), вып. 3 (67) — 29—39.
6. Ганич И. И. Синтез и свойства моно- и диэтаноламидов жирных кислот рапсового масла // Технология-2014: матер. научн.-техн. конф., 4—5 апреля 2014, Северодонецк — 28—29.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 1,3-ДИЗАМЕЩЁННЫХ-5-ИМИНОТЕТРАЗОЛОВ В КАЧЕСТВЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПРИСАДОК

Ю.М. Юркова[1,2], Ф.А. Григорьев[1], Ю.В. Григорьев[3]

[1]Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь; yu.m.yurkova@gmail.com

[2]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

[3]Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

Введение

Азотсодержащие соединения (как циклические, так и ациклические) находят широкое применение в качестве добавок к маслам и топливам различного назначения. К ряду свойств, обеспечивающихся наличием атомов азота и свободных или замещённых аминогрупп, можно отнести детонационную и коррозионную стойкость, диспергирование парафинов, окислительную стабильность, снижение износа, высокую поверхностную активность при пониженном пенообразовании и др. [1, 2]. В данном контексте полиазотистые гетероциклы (в частности, производные имидазола, 1,2,3- и 1,2,4-триазолов и тетразола) привлекают внимание исследователей вследствие высокого массового содержания азота. Перспективность использования соединений данного типа в качестве добавок к смазочным материалам подтверждается результатами работ последних десятилетий [2–4]. В работе [4] отмечаются противозадирные и антифрикционные свойства смазочных материалов, содержащих в качестве добавок производные тетразола, что актуализирует тематику настоящего исследования.

Цель

Изучение влияние 1,3-ди-замещённых-5-иминотетразолов на антифрикционные свойства базового масла на основе минерального сырья.

Материалы и методы исследования

Объектами исследований являются 1,3-дизамёщенные-5-иминотетразолы: 1,3-ди-*трет*-бутил-(5-*трет*-бутилимино)-тетразол (соединение **1**) и *N*,*N'*-(этан-1,2-диил)- бис(1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий-5-аминид) (соединение **2**). Соединение **1** было получено в ходе выполнения исследований [5], а соединение **2** — согласно методике авторов работы [6]. В качестве базового масла было использовано минеральное индустриальное масло И-20А (ГОСТ 20799-88).

Коэффициент трения смазанных пар определяли в условиях, имитирующих сопряжение вал-втулка, по методике РД 50-662-88 на машине трения СМЦ-2. Испытания проводили по схеме вал/частичный вкладыш.

Результаты и их обсуждение

Для оценки влияния содержания выбранных производных тетразола на трибологические

свойства базового масла было приготовлено шесть растворов различной концентрации (0,01; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 1 масс. %). Стоит отметить, что соединение **2** характеризуется меньшей растворимостью в базовом масле.

Результаты проведённых испытаний указывают на перспективность использования 1,3-дизамещённых-5-иминопроизводных тетразола в качестве антифрикционных присадок (рис. 1). Зависимость коэффициента трения от содержания присадок в обоих случаях носит нелинейный характер, однако значения для различных концентраций находятся в пределах от 0,055 до 0,060 для соединения **1** и от 0,053 до 0,065 для соединения **2**. Все образцы, содержащие присадки, характеризуются коэффициентом трения в 2,4–2,8 раз ниже по сравнению с исходным базовым маслом. Таким образом, изменение концентрации образцов незначительно влияет на трибологические свойства базового масла и оба соединения потенциально могут быть использованы в качестве добавок антифрикционного назначения.

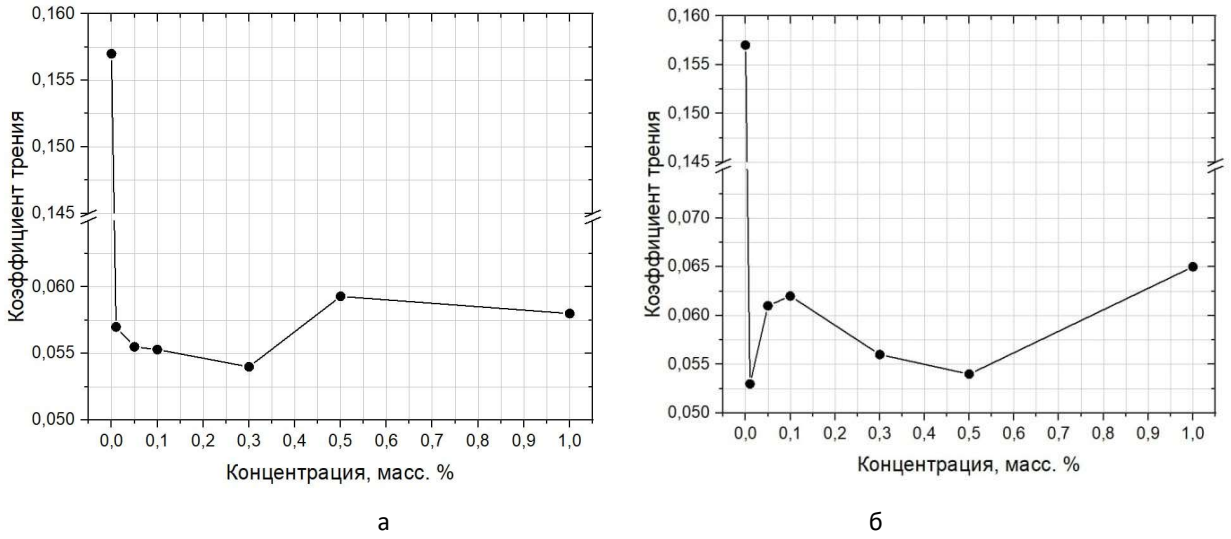


Рис. 1. **Зависимость коэффициента трения базового масла от процентного содержания добавки: а — для соединения 1, б — для соединения 2**

Выводы

Показано, что введение 1,3-дизамещённых-5-иминотетразолов в базовое масло на основе минерального сырья приводит к улучшению его антифрикционных свойств. Коэффициент трения изменяется незначительно при варьировании концентрации добавки и в общем случае наблюдается снижение трения в 2,4–2,8 раз по сравнению с исходным маслом. Результаты исследования позволяют сделать положительный вывод о возможности использования 1,3-ди-*трет*-бутил-(5-*трет*-бутилимино)-тетразола и *N*,*N'*-(этан-1,2-диил)- бис(1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий-5-аминида) в качестве антифрикционных присадок.

Благодарности

Работа выполнена частично в рамках задания НИР 2.1.01.02 ГПНИ «Химические процессы и технологии», подпрограмма 2.1 «Химические технологии переработки природного и техногенного сырья, малотоннажная химия, реагенты и материалы» (№ г.р. 20261231), а также Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий (проект T25BA-005).

1. Дорогочинская В. А., Данилов А. М., Тонконогов Б. П. Присадки к топливам и смазочным материалам. Учебное пособие. — М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина. — 2017.
2. El Ashry, E. S. H. et al. Evaluation of some functionalized imidazoles and 1,2,4-triazoles as antioxidant

additives for industrial lubricationg oils and correlating the results with the structures of additives using empirical AM1 calculations // J. Saudi Chem. Soc. — 2014 (**18**), №. 5, 443—449.
2. Zhang Y., Nguyen N. H. Azole derivatives as lubricantibg additives : патент WO2017031143A1. — 2017
3. He Zh. [et al.] Tribochemical study of tetrazole derivatives as lubricationg oil additives // Ind. Lubr. Trib. — 2005 (**57**), №. 2, 64—68.
4. Юркова Ю. М. [и др.] Синтез тетразолий-5-аминидов *трет*-бутилированием 5-аминотетразола и 1-фенил-5-аминотетразола // Свиридовские чтения – 2026 : мат. 11-й Междунар. конф. по химии и хим. образованию, 14–17 апр. 2026 г., Минск — 427—431.
5. Budevich V. A. [et al.] Mesoionic tetrazolium-5-aminides: Synthesis, molecular and crystal structures, UV-vis spectra, and DFT calculations // Beilstein J. Org. Chem. — 2021 (17), № 1, 385—395.

В сборнике представлены тезисы докладов участников IX Республиканской научно-технической конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования», посвященной актуальным проблемам материаловедения, физики, современным технологиям переработки новых материалов и композитов, применению новых методов исследования функциональных свойств, решению прикладных проблем путем математического и компьютерного моделирования.



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

ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон: +375 (0232) 34 17 12; Факс: +375 (0232) 34 17 11
mpri@mpri.org.by http://mpri.org.by