

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



**НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**VII Республиканская научно-техническая
конференция молодых ученых**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**Гомель
18-20 октября 2022**

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

VII Республиканская научно-техническая
конференция молодых ученых

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

18–20 октября 2022 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



ИММС НАН Беларуси • Гомель • 2022

УДК 620.22:678.0+539.3/6

Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы VII Республиканской научно-технической конференции молодых ученых. Гомель, 18–20 октября 2022 г. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. – 96 с.

ISBN 978-985-6477-58-7

В сборнике представлены тезисы докладов участников VII 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.

© ИММС НАН Беларуси, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (НАНОМАТЕРИАЛЫ, ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ, ПОКРЫТИЯ И ДР.).....	7
Адсорбционные свойства нетканых материалов на основе полипропилена, модифицированных многокомпонентными полимер-неорганическими покрытиями Е.В. Авдеева, А.М. Михалко	7
Адсорбционные свойства нетканых материалов на основе полипропилена, модифицированные кверцетином и оксидом цинка Е.В. Авдеева, А.С. Неверов, Н.В. Дудчик.....	8
Защитные гидрофобные покрытия на основе октадецилтрихлорсилана В.М. Акулова, А.Е. Соломянский, И.Г. Чишанков, Г.Б. Мельникова.....	10
Исследование подкладных листов из хромистого чугуна полученных методом послойной заливки В.М. Андриенко, Т.М. Рубанова, А.К. Мельдзюк.....	11
Переработка полимеров и отходов деревообработки Е.Л. Антонова.....	13
Предпосылки совершенствования структуры твердосплавного инструмента полученного из переработанного лома посредством аэродинамического звукового воздействия А.Н. Жигалов, А.Ю. Поляков, М.В. Башаримов.....	14
Изменение свойств пленочных структур на основе висмута, полученных в гальваностатическом и импульсных режимах А.А. Бондарук, А.А. Роткович, С.А. Герман, Т.И. Усович, Т.И. Зубарь, А.В. Труханов, Д.И. Тишкевич, Е.С. Дашкевич.....	15
Применение CTS в тонкопленочных солнечных элементах К.П. Бускис, А.В. Кобыляцкий, А.С. Мусаелян.....	16
Композиционные материалы W/Bi ₂ O ₃ для экранов радиационной защиты С.А. Герман, Д.И. Тишкевич, А.А. Роткович, А.А. Бондарук, Т.И. Зубарь, А.В. Труханов, Е.С. Дашкевич.....	18
Многоканальные ультрафильтрационные мембраны на основе полиэфирсульфона Т.А. Глевицкая, А.В. Бильдюкевич, Е.С. Любимова, Е.А. Назаров, Т.А. Плиско, А.С. Полин	19
Разработка композиционных материалов на основе вторичных полиолефинов К.В. Ефимчик	20
Фазовый состав, структура и свойства слоистых композитных материалов системы электрохимический сплав Zn-Ni-оксид-полимер Д.В. Зиневич	22
Влияние габаритных параметров цилиндрического экрана на его экранирующие свойства О.Д. Канафьев, В.А. Федькин, А.Н. Котельникова, Т.И. Усович, М.И. Панасюк	23
Электрохимическая модификация поверхности графита С.Н. Карзан	25
Термостимулированные токи в наноккомпозитах на основе полилактида М.А. Коваленко.....	25
Исследование процесса формирования композиционного материала фенолформальдегидная смола — коллоидный диоксид кремния П.А. Костюкевич.....	26
Влияние импульсно-реверсного режима электроосаждения на состав и структуру сплавов NiFe А.Н. Котельникова, Т.И. Зубарь, Т. И. Усович, А.А. Бондарук, А.А. Роткович, М.И. Панасюк, В.А. Федькин, О.Д. Канафьев, А.В. Труханов	28

Полиэлектролитные гидрогели на основе сополимеров акриламида с акрилонитрилом, полученные методом фронтальной полимеризации В.А. Карпович, А.Д. Шишпор, В.Е. Бабуль, Д.Л. Кудрявский, М.Б. Шуляковская, Е.В. Гринюк	30
Фотоиндуцированное протонирование полианилина в матрице полилактида С.Н. Лемешонок, Х.А. Новик, Е.Е. Шумская, А.А. Рогачев	31
Использование отходов станций обезжелезивания для получения кольматирующей добавки для строительных материалов В.А. Манкевич, А.Т. Волочко, А.А. Мечай	32
Влияние технологии получения образцов из ПАб, наполненного сажой обработанной ультразвуком, на их механические и электрические свойства Н.А. Марусенко, С.П. Богданович, А.А. Рогачев, Т.В. Жидко, Е.В. Шараев	33
Композиты на основе полипиррола, содержащие наночастицы диоксида титана Х.А. Новик, Ж.В. Игнатович, Л.Н. Филиппович, Т.В. Жидко, С.Н. Лемешонок	34
Оптимизация режимов электроосаждения сплавов CoNiP М.И. Панасюк, Т.И. Усович, Т.И. Зубарь, А.Н. Котельникова, О.Д. Канафьев, В.А. Федькин, А.В. Труханов.....	36
О необходимости организации в Беларуси малотоннажного производства твердосплавного инструмента из лома А.Н. Жигалов, А.Ю. Поляков, М.В. Башаримов	38
Модифікація паверхні слюды і алюмінію з выкарыстаннем сілаксанавай хіміі Б.В. Ранішэнка, І.А. Чалнакова, А.А. Позняк, В.У. Шманай	39
Микроструктура композитов на основе эпоксидной смолы и вольфрама для радиационных экранов А.А. Роткович, А.А. Бондарук, С.А. Герман, Т.И. Усович, Т.И. Зубарь, А.В. Труханов, Е.С. Дашкевич, Д.И. Тишкевич	40
Свойства полимеров, наполненных синтезированными графеновыми частицами В.О. Савицкий, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., В.Г. Дорodeйко, Phuong Doan Thang, Bui Hung Thang.....	42
Влияние плазмохимической обработки в присутствии остаточных газов и фторорганических мономеров на показатель капиллярности углеродной ленты В.А. Стратанович.....	43
Сравнительная оценка скорости формирования покрытий при плазменной полимеризации октафторциклобутана и 1,3-гексафторбутадиена в идентичных условиях В.А. Стратанович.....	45
Влияние дисперсных наполнителей на физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов полиуретанов А.А. Тимофеев	46
Влияние добавок термоэластопластов на структуру и свойства алифатического поликетона В.Н. Усова, Ю.М. Кривогуз, В.Н. Коваль.....	48
Влияние лиганда на состав и скорость осаждения пленок пермаллоя Т.И. Усович, Т.И. Зубарь, А.Н. Котельникова, М.И. Панасюк, А.А. Бондарук, А.А. Роткович, А.В. Труханов	49
Влияние радиационной обработки на кинетику гидролиза поли-L-лактида А.А. Федоренко, С.В. Костюк, Е.В. Гринюк	50
Фронтальная сополимеризация акриламида с акрилонитрилом в присутствии сшивающего агента в диметилсульфоксиде Е.С. Мельничук, Е.С. Карасевич, В.Е. Бабуль, А.А. Федоренко, М.Б. Шуляковская, Е.В. Гринюк	51

Молекулярная структура покрытий на основе глюкозы, осаждаемых потоком низкоэнергетических электронов Лю Имин, С.А. Фролов	52
Ультратонкие пленки на основе нанокмполитов полисахарид-AG Е.О. Чекановская, А.Е. Гилевская, В.В. Николайчук	54
Аэродинамическое упрочнение серого чугуна, полученного методом намораживания Ю.Д. Черняков, А.Н. Жигалов	55
Композиционные мембраны для нанофилтрации, полученные методом межфазной поликонденсации С.С. Шиканов, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич	56
Модифицирование полимерных волокнисто-пористых материалов и многоуровневая фильтрующая среда В.Ю. Шумская	57
Гидратцеллюлозные волокна, полученные из растворов целлюлоз различного происхождения в ортофосфорной кислоте Е.М. Татаринев, А.Э. Якас	59
Секция 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ТРИБОЛОГИЯ, ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТИ	61
Особенности применения припоя Al-40,0Ge-3,4Si мас. % для получения паяных соединений из высокопрочного алюминиевого сплава АД35 и коррозионностойкой стали Х18Н9 А.А. Иванников, А.В. Абрамов, А.Н. Сучков, М.А. Пенязь, Д.М. Бачурина, Н.С. Попов, О.Н. Севрюков	61
Прогнозирование эксплуатационных свойств искусственных кож В.Д. Борозна	62
Спектроскопическое исследование сополимера метилметакрилата-акрилонитрил-бутадиен-стирола, обработанного в низкотемпературной плазме тлеющего разряда остаточных газов Д.В. Брель, А.П. Сазанков	64
Определение анизотропии модуля упругости полиэфирэфиркетона и полиамида 66 при статическом сжатии А.С. Брундуков, И.С. Шилько	65
Эффективность разделения фаз газ-жидкость комбинированными фильтрующим элементами на основе полифениленсульфида В.Ю. Гарбарук	66
Сравнение показателей электроконтактных смазочных материалов на литиевой и кальциевой основе Ф.А. Григорьев	68
Методы исследования паропроницаемости Е.И. Ивашко	69
Температурно-барическая зависимость пробивного напряжения диэлектрических жидкостей В.В. Киселевич	71
X-Ray Study of Mixed Macromolecular Cu (II) Complexes with Acrylamide and Sodium Acrylate Copolymer and Glycine D.L. Kudryavsky, E.K. Fomina, and L.S. Ivashkevich	72
Плотность и теплостойкость полимерных фрикционных композитов, наполненных осажденными частицами дымовых газов В.К. Меринов, Л.А. Антанюк, В.А. Лапицкий	73
Структура и свойства покрытий оксида вольфрама, формируемых из активной газовой фазы А.М. Михалко	74

Оптимизация технологии получения отливок с применением методов нейросетевой кластеризации И.В. Предчанко, В.А. Жаранов, И.Б. Одарченко	76
Реологические свойства совместных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы с альгинатом натрия Ю.С. Просмыцкая, Д.Д. Лаппо	77
Усталостное изнашивание стали 16CRMNS5 А.В. Рабков, И.Н. Степанкин, Е.П. Поздняков, Д.В. Кунс, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев	79
Исследование влияние рН среды на скорость эрозионно-коррозионного изнашивания Е.О. Решиков, С.В. Чернышов, П.П. Бешапов, М.В. Прожега	80
Исследование ресурса пластичных смазочных материалов в подшипниках качения в экстремальных условиях Е.О. Решиков, М.В. Прожега, Н.Н. Смирнов	82
Стенд для трибологических испытаний по ASTM G99 Е.О. Решиков, Е.О. Константинов, М.В. Прожега	83
Анализ упругого поведения конструкционных непрерывно армированных стеклопластиков при статическом нагружении А.П. Сазанков	85
Влияние температуры отжига на структуру слоистых метал-углеродных покрытий К.А. Саховский, Д.Г. Пилипцов	86
Моделирование температуры и напряжений в высокоточных резьбовых соединениях Е.М. Тихон	88
Особенности влияния импульсного режима осаждения пленок NiFe на магнитоимпедансный эффект В.А. Федькин, Т.И. Зубарь, А.Н. Котельникова, М.И. Панасюк, О.Д. Канафьев, Т.И. Усович, А.В. Труханов	89
Ферромагнитный и спин-волновой резонанс в тонком ферромагнитном слое А.О. Шаплов	90
Влияние длительности хранения препрегов на механические свойства лыж Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич	91

АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ПОЛИМЕР-НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Е.В. Авдеева¹, А.М. Михалко²

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

²Международная Китайско-Белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям,
Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

Изменение структуры поверхностного слоя волокон нетканых материалов позволяет улучшать их эксплуатационные характеристики и придавать новые свойства (адсорбционные, антибактериальные и др.) [1]. Перспективным является нанесение наночастиц металлов, оксидов металла и капсулирование их в полимерах для увеличения гидрофобных свойств материала и обеспечения пролонгированного действия антибактериальных компонентов. Такие материалы могут быть использованы при производстве изделий медицинского и санитарно-гигиенического назначения с широким спектром действия: ускорение процессов заживления ран, уменьшение травматизации раневой поверхности при наложении и снятии повязок, с высокими показателями износостойчивости, прочности.

Цель работы — установление особенностей влияния структуры модифицирующих покрытий на морфологию поверхности, смачиваемость, сорбционные характеристики нетканых материалов марок Aquaspun, Spunbel.

Материалы и методы. Нанесение модифицирующих покрытий производилось из газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым диспергированием политетрафторэтилена PTFE (ООО «Завод полимеров Кирово-Чепецкого химического комбината», РФ), оксида цинка (ZnO, $d < 100$ нм, Sigma Aldrich, 5 мас. %), в вакууме. Мишень диспергировалась электронным пучком с энергией 800—1600 эВ и плотностью тока 0,01—0,03 А/см². Нанесение покрытий проводилось при начальном давлении остаточных газов в вакуумной камере $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ Па. Среднее расстояние от электронной пушки до мишени составляло 150 мм, а от мишени до образца — 200 мм [2—4]. Модифицирующее покрытие наносилось слоями ZnO-PTFE. В качестве подложки использованы нетканые полимерные материалы Aquaspun с поверхностной плотностью 90 г/см², Spunbel — 40 г/см² («СветлогорскХимволокно», Беларусь).

Молекулярную структуру покрытий определяли с помощью ИК-Фурье спектрофотометра Vertex-70 (Bruker, Германия). Морфологию и элементный состав покрытий изучали на электронном микроскопе JEM-6000 (Jeol, Япония) с приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДА, США, FEI Quanta 200 FEG). Эффективность воздушной фильтрации (ЭВФ) определяли с помощью специально разработанной лабораторной установки [5]. Сбор и расчет параметра ЭВФ материалов проводили с помощью специально разработанной программы в среде Labview. Поверхностные свойства исходных и модифицированных образцов оценивали по краевому углу смачивания (КУС) водой при объеме капли 5,0 мкл. Определение КУС образцов по полученным изображениям проводили в программе ImageJ, усредняя значения 5 измерений.

Результаты и их обсуждение. Анализ морфологии покрытий методом СЭМ показал наличие плотного равномерного слоя с включением частиц цинка на волокнах материалов. без изменения их взаимного расположения. Анализ методом ЭДА показал наличие фтора (PTFE) от 6 до 43 мас. %, цинка (ZnO) от 4 до 42 мас. % на поверхности материалов Aquaspun и Spunbel.

На ИК-спектрах материалов проявляются следующие полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям СН-групп: 2931—2945 см⁻¹, 2852 см⁻¹ и 2886 см⁻¹, ассиметричным деформационным колебаниям С—СН₃-групп (1450 см⁻¹). Также присутствуют полосы симметричных колебаний групп С—СН₃, —С—(СН₃)₂-, колебаний скелета (СН₃)₃—С—R (1218—1255 см⁻¹) и (СН₃)₂—С (1166 см⁻¹).

Для образцов Aquaspun модифицированных PTFE наблюдается полоса с максимумом поглощения при 1211 см⁻¹, соответствующая ассиметрическим деформационным колебаниям групп С—F₂.

Адсорбционные характеристики модифицированных материалов во многом определяют их фильтрационные и антибактериальные свойства. Исходные Aquaspun и Spunbel обладают гидрофобными свойствами, модифицирование поверхности волокон слоями ZnO + PTFE повышает КУС материалов с $110^\circ \pm 2,2^\circ$ до $113^\circ \pm 2,1^\circ$ для Aquaspun и с $103^\circ \pm 2,3^\circ$ до $116^\circ \pm 2,4^\circ$ для Spunbel. Модифицирование Aquaspun и Spunbel

ZnO - PTFE приводит к значительному увеличению ЭВФ с 62 % до 76 % и с 20 % до 66 % соответственно. Модифицирование нетканых материалов PTFE позволяет увеличить гидрофобные свойства материалов, обеспечить барьерные свойства и эффект самоочистки. Из рассмотренных выше модифицированных материалов был определен трехслойный материал для масок. Образцы представляют собой различные комбинации слоев нетканых материалов на основе Spunbel и Aquasun. Эффективной ($90 \pm 0,5$ %) оказалась комбинация слоев Spunbel 40 / ZnO - PTFE Aquasun 90 / Spunbel 40.

Методом ЭЛД на поверхности волокон были осаждены послойные покрытия ZnO - PTFE. Основой покрытия является слой гидрофобного, нетоксичного полимера PTFE, который удерживает антибактериальный компонент (ZnO) на поверхности материала и обеспечивает медленное его высвобождение.

Предложенный метод многокомпонентного нанесения полимер-неорганических покрытий на полипропиленовых материалах с применением активных антибактериальных компонентов может быть использован для создания и производства средств индивидуальной защиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ X21Y3BG-030.

1. Авдеева Е.В. Фильтрационные и антибактериальные свойства модифицированных нетканых материалов на основе полипропилена / Е.В. Авдеева, Е.Е. Шумская, А.В. Петкевич, Н.В. Дудчик, А.Д. Олейник, А.М. Михалко, Х.Э. Юнусов, А.А. Рогачев, В.Е. Агабеков // ПОЛИКОМТРИБ-2022: тезисы докладов междунар. научно-технической конф. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. — 26 с.
2. Рост полимерных покрытий из активной газовой фазы / А.В. Рогачев, В.П. Казаченко, М.В. Буй, А.И. Егоров // Материалы, технология, инструмент. — 1998 — Т. 3, № 1 — С. 60–64.
3. Applied Surface Molecular structure and optical properties of PTFE-based nanocomposite polymer - metal coatings / A.V. Rahachou, A.A. Rogachev, M.A. Yarmolenko, J. Xiao-hong, and L. Zhu // Appl. Surf. Sci., vol. 258, no. 6, pp. 1976–1980, 2012, doi: 10.1016/j.apsusc.2011.05.084.
4. Growth of polymer coatings the active gas phase / A.V. Rahachou, V.P. Kazachenko, M.V. Bui, A.I. Egorov // Materials, technology, instrument. — 1998. — Vol. 3, No. 1. — pp. 60–64.
5. Авдеева Е.В. и др. Эффективность фильтрации отечественных нетканых материалов на основе полипропилена Сб. матер. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, отд. физ., матем. и инф. НАНБ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. — Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. 292–299.

АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КВЕРЦЕТИНОМ И ОКСИДОМ ЦИНКА

Е.В. Авдеева¹, А.С. Неверов², Н.В. Дудчик³

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

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

³Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены», Минск, Беларусь

Полипропиленовые волокна характеризуются низкой стоимостью, высокой прочностью на изгиб и удар, а также высокой устойчивостью к химическим веществам, влаге. В последнее время уделяется внимание разработке многофункциональных текстильных материалов, позволяющих расширить ассортимент продукции на их основе. На полипропиленовых волокнах проблематично зафиксировать биоцидный препарат, поскольку на поверхности имеется малое количество активных групп. Известным подходом по решению проблемы повышения адгезии является нанесение двухкомпонентных покрытий раствором методом на основе полиэфира, например путем двухстадийной обработки [1]. Капсулирование в полиэфире активных компонентов увеличивает гидрофобные свойства материала и обеспечивает пролонгированное действие антибактериальных компонентов. Для придания материалам биоцидных свойств использовали экологически безопасные вещества: кверцетин и оксид цинка. Кверцетин обладает противовоспалительным, антиоксидантным действием, стабилизирует клеточные мембраны, замедляет процесс старения клеток кожи [2, 3] Такие материалы могут быть использованы при производстве изделий медицинского и санитарно-гигиенического назначения.

Цель работы — установление особенностей влияния структуры модифицирующих покрытий на морфологию поверхности, смачиваемость, сорбционные характеристики и антибактериальные свойства нетканых материалов марки Aquasun.

Материалы и методы. Формирование покрытий раствором методом осуществляли в две стадии. Образцы ткани размером 100×100 мм помещали в фильтр Шотта на поверхность наносили водно-спиртовые растворы с помощью фильтрации под вакуумом при разнице давления 10 мм. рт. ст. После материалы просушивали при комнатной температуре. Поверхность образцов обрабатывалась водно-спиртовым раствором

полиэтиленгликоля. Для формирования модифицирующих покрытий использовали спирт технический, дистиллированную воду ГОСТ6709–72, оксида цинка (ZnO, $d < 100$ нм, Sigma Aldrich, 5 мас. %), кверцетин (ГОСТ 4754–97), полиэтиленгликоль с молекулярной массой 600 г·моль⁻¹ ПЭГ (Sigma Aldrich). В качестве подложки использованы нетканые полимерные материалы Aquasprun с поверхностной плотностью 90 г/см² («СветлогорскХимволокно», Беларусь).

Молекулярную структуру покрытий определяли с помощью ИК-Фурье спектрофотометра Vertex-70 (Bruker, Германия). Морфологию и элементный состав покрытий изучали на электронном микроскопе JEM-6000 (Jeol, Япония) с приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДА, США, FEI Quanta 200 FEG). Эффективность воздушной фильтрации (ЭВФ) определяли с помощью специально разработанной лабораторной установки [4]. Сбор и расчет параметра ЭВФ материалов проводили с помощью специально разработанной программы в среде Labview. Поверхностные свойства исходных и модифицированных образцов оценивали по краевому углу смачивания (КУС) водой при объеме капли 5,0 мкл. Определение КУС образцов по полученным изображениям проводили в программе ImageJ, усредняя значения 5 измерений. Антибактериальную активность образцов модифицированных кверцетином, оксидом цинка и исходного Aquasprun проводили в РНПЦГ в условиях прямого контакта со стандартизированными тест-культурами (*E. coli* ATCC 11229, *St. aureus* ATCC 6538, *Kl. pneumoniae* ATCC 13883) на поверхности агаровой среды в соответствии с международным стандартом [5].

Результаты и их обсуждение. Анализ морфологии покрытий методом СЭМ показал наличие равномерного слоя полиэтиленгликоля, который обволакивал частицы оксида цинка, и кверцетина. (рис. 1). Анализ методом ЭДА показал наличие оксида цинка на поверхности волокон Aquasprun не менее 0,05 мас. %.

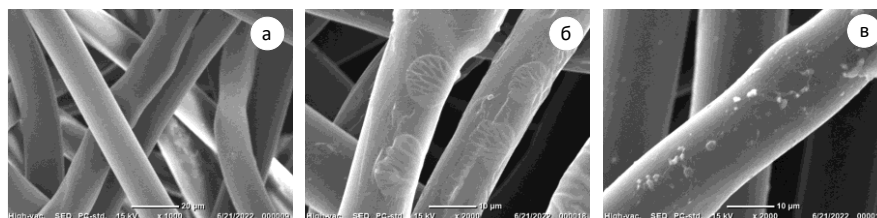


Рис. 1. СЭМ-изображения исходного AquaSprun (а), AquaSprun модифицированного кверцетином и ПЭГ (б), AquaSprun модифицированного кверцетином ZnO и ПЭГ (в).

В процессе модифицирования материалов кверцетином и оксидом цинка растворным способом происходит объемное распределение активных компонентов, однако большая часть остается на лицевой поверхности волокон.

Модифицирование поверхности материала многокомпонентными слоями кверцетин-ПЭГ и кверцетин-ZnO-ПЭГ значительно снижают ЭВФ исходного Aquasprun с 63 % до 35 % для Aquasprun/кверцетин-ПЭГ и 36 % — Aquasprun/кверцетин-ZnO-ПЭГ. Модифицирования ПЭГ позволяет увеличить гигроскопичность материала. Применить подобные нетканые материалы можно для изделий краткосрочного пользования, например, перевязочный материал. Значительных изменений КУС для модифицированных материалов не наблюдали, для исходного Aquasprun $114^\circ \pm 2,2^\circ$ с покрытием Aquasprun/кверцетин-ПЭГ $110^\circ \pm 2,1^\circ$, Aquasprun/кверцетин-ZnO-ПЭГ $101^\circ \pm 2,3^\circ$, поверхность остается гидрофобной.

Исходный образец нетканого материала Aquasprun не проявляли антибактериальной активности, что подтверждается отсутствием ингибирования роста бактерий в зоне контакта и подавления роста бактерий. Для образцов Aquasprun покрытых кверцетином, кверцетином с ZnO, наблюдалось подавление роста бактерий *St. aureus*, *E. coli*, *Kl. pneumoniae*.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что предложенный двухстадийный метод многокомпонентного нанесения полимер-неорганических покрытий на полипропиленовых материалах с применением активных антибактериальных компонентов может быть использован для создания изделий медицинского назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ X21Y3BG-030.

1. Модифицированный материал, модифицированный антимикробный материал, способы получения модифицированного материала, способ формирования антимикробного покрытия на устройство и медицинское устройство, предназначенное для использования в контакте с электролитом на основе спирта или воды, с антимикробным покрытием: Патент РБ/Р.Э. Баррел [и др.]; заявитель Уэстэм Биомедикал Корп. (СА), патетобладатель НУКРИСТ ФАРМА-СЕУТИКАЛС КОРП. (СА). № 2297; заявл. 30.11.1994; опубл. 19.05.1993
2. Manach C., Regerat F., Texier O., Agullo G., Demigne C., Remesy C. // Nutr. Res. 1996. 16. P. 517
3. Wei B.L., Lu C.M., Tsao L.T., Wang J.P., Lin C.N. // Planta Med. A. 2001. 67. P. 745.

4. Авдеева Е.В. и др. Эффективность фильтрации отечественных нетканых материалов на основе полипропилена Сб. матер. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, отд. физ., матем. и инф. НАНБ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»; редкол.: С.А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГТУ им. Ф. Скорины, 2021. 292–299.
5. ISO 20645:2004 Textile fabrics - Determination of antibacterial activity-agar diffusion plate test.

ЗАЩИТНЫЕ ГИДРОФОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКТАДЕЦИЛТРИХЛОРСИЛАНА

В.М. Акулова^{1*}, А.Е. Соломянский¹, И.Г. Чишанков¹, Г.Б. Мельникова²

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

*myfavoritecheese@mail.ru

Октадецилтрихлорсилан (ОТС) является классическим гидрофобизатором поверхностей кремния [1–3], слюды [4], стали [5], полиуретана [6]. Покрытия на основе ОТС находят применение в фильтрах [6], биосенсорах [7], полевых транзисторах [7, 8], прецизионных узлах трения и микроэлектромеханических устройствах (МЭМС) [1, 3, 7]. Обработка ОТС трущихся поверхностей в МЭМС и прецизионных узлах трения обеспечивает увеличение срока их эксплуатации [1, 3]. Получение покрытий на основе органохлорсиланов чаще всего осуществляют методом самоорганизации [1, 2, 5] или осаждением из газовой фазы [4, 7]. Изучены гидрофобные и трибологические свойства классического защитного гидрофобного покрытия на основе ОТС, используемого в прецизионных узлах трения [3].

Цель работы — сформировать методом центрифугирования гидрофобное покрытие на основе олигомеров октадецилтрихлорсилана для защиты микроэлектромеханических устройств и прецизионных узлов трения от воздействий влаги и изнашивания.

Материалы и методы. Методом центрифугирования на пластинах монокристаллического кремния прямоугольной формы площадью 1,5 см² формировали покрытия на основе гидролизованного ОТС (г-ОТС) при вращении подложки скоростью 1800 об/мин. Предварительно подложки подвергали гидрофилизации [3]. Продолжительность процесса вращения подложек составляла 30 с. Гидролиз ОТС осуществляли в толуоле в присутствии концентрированной соляной кислоты. Для получения покрытий использовали раствор г-ОТС в толуоле концентрацией 20 мг/мл.

Износоустойчивость покрытия изучали на трибометре возвратно-поступательного типа (ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси). Условия трибоиспытаний: приложенная нагрузка — 1,0 Н, индентор — стальной шарик диаметром 3,0 мм (сталь 95Х18), длина хода индентора — 3,0 мм, его линейная скорость — 4,0 мм/с. Тестирование прекращали при достижении значений коэффициента трения (k_f) ~ 0,4 [3]. Краевой угол смачивания (КУС) покрытий измеряли методом «неподвижной» капли дистиллированной воды объемом 3 мкл на приборе DSA100E (Kruss, Германия). Таким же образом исследовали смачиваемость водой и трибологические свойства мономолекулярной пленки на основе ОТС, полученной на поверхности кремния методом самоорганизации [3].

Результаты и их обсуждение. Кремниевая подложка без покрытия гидрофильна, ее КУС водой равен 5,0° [3]. Для покрытий на основе г-ОТС на кремнии, полученных методом центрифугирования, значение КУС составляет $107,8^\circ \pm 1,6^\circ$. Покрытие ОТС на кремнии, полученное методом самоорганизации, имеет значение КУС водой равное $105,6^\circ \pm 2,6^\circ$ [3].

Кремний при нагрузке 1,0 Н разрушается в течение одного цикла скольжения, при этом коэффициент трения материала возрастает от 0,25 до 0,70. Значения k_f для полученных покрытий на основе г-ОТС не превышает ~ 0,08. Кремниевые поверхности с монослоем ОТС и покрытием г-ОТС, достигают граничных условий трибоиспытаний после $29,0 \pm 4,0$ и $91,0 \pm 15,0$ циклов скольжения стального шарика по образцу соответственно (рис. 1).

Заключение. Показана возможность получения методом центрифугирования покрытий гидролизованного ОТС на поверхности монокристаллического кремния, увеличивающих значение краевого угла смачивания водой с 5° до 108°. Износоустойчивость покрытия на основе гидролизованного ОТС, сформированного на кремнии методом центрифугирования, в 3,1 раза больше, чем монослоя ОТС, полученного методом самоорганизации. Данные покрытия могут быть использованы для увеличения износостойкости прецизионных узлов трения, а также защиты изделий различного функционального назначения от влаги и загрязнений.

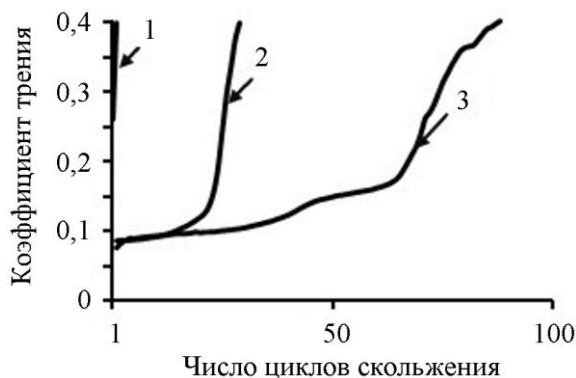


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения кремниевой поверхности от числа циклов скольжения: 1 — кремниевая поверхность без покрытия; 2 — монослой ОТС, полученный методом самоорганизации; 3 — покрытие на основе г-ОТС, полученное методом центрифугирования

1. Li M. [et al.] Preparation and tribological properties of self-assembled tetraethoxysilane/octadecyltrichlorosilane bilayer films // Surf. Topogr. Metrol. Prop. — 2019 (7), 1—17
2. Jin J. [et al.] Metal-insulator-metal diodes based on alkyltrichlorosilane self-assembled monolayers // AIP Advances. — 2019 (9), 1—6
3. Akulova V. [et al.] Formation and tribological properties of octacosanoic acid monomolecular Langmuir-Blodgett films // Soft Materials. — 2022 (20), № 2, 161—167
4. Huang J. [et al.] Octadecyltrichlorosilane Deposition on Mica Surfaces: Insights into the Interface Interaction Mechanism // J. Phys. Chem. B. — 2017 (121), № 14, 3151—3161
5. Sutar R. S. [et al.] Octadecyltrichlorosilane-Modified Superhydrophobic-Superoleophilic Stainless Steel Mesh for Oil-Water Separation // Spec. Iss.: Internat. Conf. on Adv. in Mater. Sci. — ICAMS 2021. — 2021 (400), № 1, 2100096
6. Liu D. A Robust Superhydrophobic Polyurethane Sponge Loaded with Multi-Walled Carbon Nanotubes for Efficient and Selective Oil-Water Separation // Nanomaterials. — 2021 (11), 1—14
7. Teodoroff-Onesim S. Synthesis of octadecyltrichlorosilane self-assembled monolayer films by vapor deposition on plasma activated silicon substrates // Thin Solid Films. — 2021 (736), 1—9
8. Babajanyan A. [et al.] Performance of Pentacene Based Organic Thin Film Transistor with an Octadecyltrichlorosilane Self-Assembled Monolayer Interface // J. Contemp. Phys. — 2021 (56), 208—213

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДКЛАДНЫХ ЛИСТОВ ИЗ ХРОМИСТОГО ЧУГУНА ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЗАЛИВКИ

В.М. Андриенко, Т.М. Рубанова, А.К. Мельдзюк

Институт технологии металлов НАН Беларуси, Могилев, Беларусь; slavanski@gmail.com

Перспективным является метод послойной заливки расплава, который потенциально позволяет преодолеть перепад твердости по сечению и убрать сегрегацию по структуре. На примере детали «Лист подкладной» был проведен эксперимент по изучению микроструктуры и твердости отливок, полученных по технологии послойной заливки.

Подкладной лист является защитной деталью центробежного дробильно-размольного оборудования и изготавливается в комбинированной форме, где средняя часть из холодно-твердеющей смеси (ХТС) находится между верхней и нижней металлическими плитами. Нижняя плита укрывалась кремнеземной термостойкой тканью, а верхняя красилась противопожарной краской. Подкладной лист представляет собой деталь переменного сечения, у которой рабочий элемент (утолщение) толщиной 19 мм выступает над тонкой частью (подложкой) толщиной ~10 мм.

Детали отливались методом послойной заливки расплава из износостойкого хромистого чугуна с 3,65 % С и 18,33 % Cr, экономно легированного Ni, Mn, W, V, и Mo. Расплав готовили в индукционной печи ИСТ-0,25/0,32И1. Температура расплава в ковше перед разливкой в формы составляла 1420—1380 °С. Заполнение формы происходило сквозь верхнюю плиту в районе утолщения листа через литниково-питающую чашу из ХТС.

Для фиксации уровня заполнения слоев на их предполагаемых границах в формах были установлены термопары, которые выступали в качестве маячков. В форму для двухслойного подкладного листа, устанавливалась одна термопара на расстоянии 10 мм от дна формы. Для трехслойного подкладного листа устанавливались две термопары на расстоянии 10 мм и 19 мм от дна. В процессе заполнения формы расплавом (в

момент его контакта с термопарой) происходит фиксация резкого скачка температуры, что сигнализирует о достижении необходимого уровня, и его подача прекращается. После десятисекундной выдержки происходит заливка следующего слоя. Конечный (второй или третий) слой заливается вместе с литниково-питающей чашей.

По итогам эксперимента получено два подкладных листа (рис. 1, а), из которых были вырезаны образцы для изучения микроструктур и испытаний на твердость (рис. 1, б).

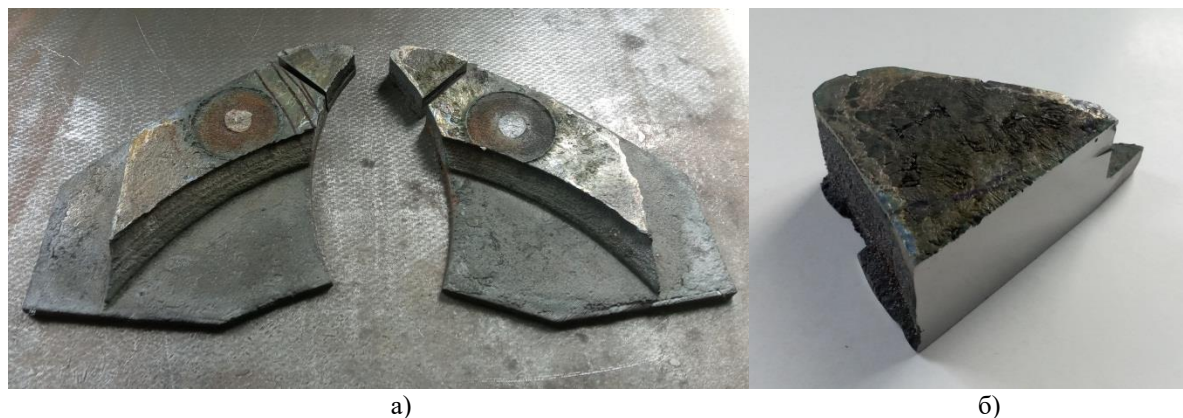


Рис. 1. Экспериментальные подкладные листы (а) и вырезанный образец (б)

Предполагаемые границы первого и второго слоев на обеих деталях, исходя из их визуализации на внешней поверхности, находятся в диапазоне 8—10 мм от нижней плоскости. Граница второго и третьего слоев в трехслойном подкладном листе находится в диапазоне 21—22 мм. Однако по микроструктуре они визуально неразличимы. Вместе с тем, граница фронтов кристаллизации у двухслойного подкладного листа хорошо визуализируются на шлифе невооруженным глазом и находится на расстоянии 11,5 мм от низа детали, а у трехслойного — 13,5 мм. При этом, в стандартном подкладном листе, изготавливаемом на опытно-производственном участке ИТМ НАН Беларуси, граница фронтов кристаллизации находится на расстоянии 11,5 мм от низа детали.

Результаты испытаний на твердость по сечению образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Твердости по сечению подкладных листов

Глубина (снизу вверх), мм	Среднее значение HRC двухслойного образца	Среднее значение HRC трехслойного образца
6	51,5	51,33
9	50,83	50,33
12	52,33	51
15	52	52,17
18	53,5	53
21	54,83	55,33
24	54,17	57,33

Как видно из таблицы, в обоих подкладных листах наблюдается повышение твердости от низа детали по сечению образцов. Причем для трехслойного подкладного листа увеличение твердости наблюдается по всему измеряемому сечению образца, на что, по-видимому, оказывает влияние заливка третьего слоя. Локальное снижение твердости на глубине в 9 мм по сечению обоих образцов предположительно связано с тем, что в этой области проходит граница между первым и вторым слоями отливки.

Из всего вышесказанного следует вывод: несмотря на то, что на поверхности деталей в целом слои отчетливо различимы, по микроструктуре получается однородная отливка, практически не отличимая от обычной, получаемой сплошной заливкой. Граница фронтов кристаллизации в трехслойном подкладном листе находится на два миллиметра выше, чем в двухслойном или стандартном. В трехслойном подкладном листе твердость повышается более значительно по всему измеряемому сечению образца.

Работа по изучению факторов, влияющих на формирование структуры отливки, полученных по технологии послойной заливки, будет продолжена, в том числе на другом типе деталей.

ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ И ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ

Е.Л. Антонова

Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации»,
Гомель, Беларусь; viramaina3@yandex.by

Введение. Уровень развития современного общества определяется тем, насколько органично в нем сочетаются технологический уровень производств и внимание к проблеме охраны окружающей среды. Одним из перспективных вариантов соединения этих аспектов является расширение использования вторичного сырья для изготовления различных изделий общетехнического и бытового назначения. Вовлечение вторсырья в повторный оборот, с одной стороны, позволяет снизить уровень загрязнения природной среды, а с другой стороны — получить выгоду от экономии первичных ресурсов. Это соображение справедливо по отношению к такому крупнотоннажному отходу, как вторичные полимеры. Их рециклинг остро стоит в повестке дня развитых стран мира.

Цель работы — иллюстрация возможности применения вторичных полимеров и отходов деревообработки в композиционных материалах — древопластиках, предназначенных для изготовления технически ценных изделий.

Материалы и методы. Исследовали экспериментальные образцы древопластиков, изготовленные методом соэкструзии смесей вторичных полиэтилена ПЭ, полипропилена ПП, АБС-пластика, отходов переработки (древесная мука), а также непосредственно отходов некондиционных древопластиков. В составе композиций применяли технологические добавки — стеараты и вазелиновое масло.

Результаты и их обсуждение. Свойства древопластиков главным образом определяются характером связей и взаимодействий между полимерной матрицей и наполнителем. Количество древесного наполнителя в композите может составлять до 80 мас. %. Основной технологической проблемой в производстве таких высоконаполненных композитов является совмещение гидрофильной основы древесного наполнителя с гидрофобной полимерной матрицей. Кроме того, увеличение содержания древесно-растительного наполнителя в диапазоне 60—80 мас. % без введения модифицирующих добавок может вести к быстро растущей потере прочностных свойств изделия. Выбор полимерной матрицы проводили с учетом технологических режимов экструзионной переработки, физико-механических свойств, а также стоимости сырья на рынке. Предложено использовать следующие термопластичные связующие, перерабатываемые методом экструзии: первичный ПП марки РРН030GP (ТУ 2211-001-76332549-2012); первичный ПЭВД марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77); первичный ПЭНД марки 273-79 (ГОСТ 16338-85); вторичный АБС-пластик марки 2806-31 (ТУ 2214-042-05762341-2014).

В качестве наполнителя использованы отходы, образующиеся при производстве деталей потолка тракторов МТЗ. Объем образования данного отхода составляет около 40 тонн в год. Отходы представляют собой куски листового древопластика из ПП с приклеенными в процессе формовки полиэфирными тканями и наполненного древесной мукой в количестве 60 мас. % (рис. 1).



Рис. 1. Отходы листового полипропилена: исходные (слева)
и после отделения полиэфирной ткани и измельчения (справа)

Технологический процесс подготовки наполнителя включал следующие операции: отделение полиэфирной ткани; измельчение с получением дробленного композита; фракционный отсев частиц композита; сушка композита. Компоненты композиций дозировали с использованием электронных весов в необходимых весовых соотношениях согласно разработанным оригинальным рецептурам. Содержание отходов в композициях составляло 50—80 мас. %. Смешение компонентов производили с использованием лопастного смесителя до получения однородного состава. По результатам физико-механических испытаний экспериментальных образцов осуществляли оптимизацию составов с введением необходимых модифицирующих добавок.

Установлены показатели свойств сформированных композитов — водопоглощение в диапазоне 2,9—6,5 %, прочность при изгибе — 13,7—26,1 МПа, ударная вязкость по Шарпи — 5,3—7,7 кДж/м². Наиболее высокой ударной вязкостью отличаются композиции на основе ПП и ПЭВД. По-видимому, в их объеме лигноцеллюлозный компонент (отходы деревообработки) распределен в жесткой матрице оптимальным образом,

что свидетельствует о малой степени дефектности и о необходимости затратить больше энергии на разрушение структуры. Лучшими показателями по критерию водопоглощения характеризуются композиции на основе ПП и ПЭНД. Это может быть объяснено формированием этими полимерами наиболее прочной и малодефектной матрицы, в которой лигноцеллюлозные включения (даже при высоком процентном содержании) окружены непроницаемой прочной полимерной фазой, вследствие чего лишены возможности реализовать свои гидрофильные свойства. Основные показатели свойств экспериментальных образцов древопластиков находятся на достаточно высоком уровне, соответствующем европейскому. Такие материалы могут быть успешно применены в строительстве и в отделочных работах.

Выводы. Возможность получить на основе древопластиков, в которых основными компонентами являются отходы, ценные изделия с приемлемым набором технических характеристик чрезвычайно важна в условиях необходимости экономии первичных ресурсов. Представляется, что улучшение свойств таких материалов, как древопластики, может быть достигнуто путем целенаправленного регулирования межфазных процессов и структурных превращений в граничных слоях, разделяющих различные фазы композита. Такие физико-химические явления, как смачивание, миграция, адгезия, текучесть, пластификация, сшивание, представляют собой перспективный предмет изучения материаловедения. Справедливо предположить, что формирование градиентной полимерной матрицы позволяет управлять механическими характеристиками, сохраняя упруго-эластические свойства.

Работа выполнена в рамках подпрограммы 2 ГП «Наукоемкие технологии и техника» (договор № 12-01/19Б) и темы 4.2.2 (НИР 2) ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

ПРЕДПОСЫЛКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ПЕРЕРАБОТАННОГО ЛОМА ПОСРЕДСТВОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.Н. Жигалов, А.Ю. Поляков, М.В. Башаримов

Институт технологии металлов НАН Беларуси, Могилев, Беларусь; BasharimovFilm@gmail.com

Твердые сплавы являются основными инструментальными материалами, поскольку обеспечивают высокопроизводительную обработку резанием благодаря использованию скоростей резания в 2—3 раза выше, чем скорости резания, принятые для инструмента из быстрорежущей стали.

Дислокации, созданные в процессе производства твердого сплава способствуют образованию высокой твердости, равной 85—92 HRA, что и является основным преимуществом твердых сплавов, но и одновременно с этим возникают недостатки твердых сплавов, такие как хрупкость. Упрочнение твердых сплавов является эффективным направлением их совершенствования для улучшения основных показателей качества структуры и режимов резания твердосплавного инструмента.

Проведенные научные исследования показали, что разработанный метод аэродинамического звукового воздействия обеспечивает перестройку структуры твердого сплава за счет самоорганизационных процессов, происходящих на уровне кристаллических решеток и дислокационных образований после воздействия на твердосплавный инструмент акустическими волнами звуковой частоты, приведенных в резонансное состояние, совместно с тепловым нагревом упрочняемого изделия.

После прекращения действия внешнего воздействия резонансных волн звуковой частоты большинство образовавшихся новых структур переходят в равновесное состояние, не являющееся повторением ранее существовавшего, в результате чего происходит перестройка кристаллических решеток и коллективное движение групп дислокаций на «мезоскопическом» уровне, аннигиляция дислокационных структур. При возникновении таких явлений в структуре твердых сплавов происходит ряд изменений свойств, связанных с повышением ударной вязкости и сохранением заданной высокой твердости, что обеспечивает повышение износостойкости твердосплавного режущего инструмента в условиях прерывистого резания с ударными нагрузками.

Перспективным направлением является применение аэродинамического звукового воздействия с целью совершенствования структуры твердых сплавов, получаемых из переработанного лома методом цинкотермии. Твердосплавная продукция, полученная из низкосортного сырья, имеет искажаемость структуры значительно выше, чем полученная непосредственно из порошка. Однако, при этом все структурные несовершенства имеют один и тот же характер. Следовательно, можно предположить, что аэродинамическое звуковое воздействие обеспечит совершенствование структуры твердосплавного инструмента, полученного из переработанного лома.

Таким образом, аэродинамическое звуковое воздействие может быть весьма эффективным и при совершенствовании структуры твердосплавного инструмента, полученного из переработанного твердосплавного лома, что нуждается в дальнейшем изучении, поскольку может дать весьма ощутимый эффект при небольшой себестоимости.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВИСМУТА, ПОЛУЧЕННЫХ В ГАЛЬВАНОСТАТИЧЕСКОМ И ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

А.А. Бондарук¹, А.А. Роткович¹, С.А. Герман^{1,2}, Т.И. Усович¹, Т.И. Зубарь¹,
А.В. Труханов¹, Д.И. Тишкевич¹, Е.С. Дашкевич¹

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь; E-mail: bondaruk625@gmail.com

Введение. Бурное развитие в настоящее время функциональных устройств, используемых в различных областях, обуславливает совершенствование микро- и нанoeлектроники. Одним из важных требований к таким устройствам является повышение стабильности их функционирования не только в нормальных, но и в экстремальных условиях (температура, влажность, воздействие ионизирующего излучения (ИИ) и др.). Так, электронные устройства, применяемые в авиационной, аэрокосмической, атомной промышленности, работают в критических условиях, подвергаясь радиационному воздействию естественного и искусственного происхождения (электроны, гамма-излучение, тяжелые заряженные частицы и др.).

Свинец является наиболее распространенным материалом, используемым для радиационной защиты. Однако, несмотря на невысокую цену, его применение ограничено по причине высокой токсичности. Альтернативой свинцу может стать висмут, который находится рядом в таблице Менделеева и имеет такие же высокие значения плотности. Висмут нетоксичен и имеет низкую себестоимость, а широкие технологические возможности его производства делают весьма актуальным использование данного материала для радиационной защиты.

Цель работы — исследование влияния условий электроосаждения Вi на параметры микроструктуры пленок, оценка перспективности использования пленок на основе Вi в качестве материала радиационных экранов.

Материалы и методы. Пленки висмута (Вi) осаждались на медную (Cu) подложку толщиной 70 мкм, обработанную смесью венской извести, состоящей из CaO и MgO в равных объемах. Затем обезжиренную поверхность медных подложек полировали в растворе персульфата аммония (120 г/л $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ + 20 г/л H_2SO_4) в течение 30 с для удаления оксидной пленки с поверхности Cu. Электрохимическое осаждение Вi проводили из перхлоратного электролита в двух режимах: гальваностатическом и импульсном. Образцы Вi, полученные в гальваностатическом режиме, осаждали при плотности тока 10—25 мА/см², в импульсном режиме — 15 мА/см². В качестве анодов использовались висмутовые стержни диаметром 8 мм, содержащие 97,5 % Вi и до 2,5 % PbO₂. Электроосаждение Вi проводили с использованием потенциостата/гальваностата Р45-Х.

Изучение морфологии поверхности и химического состава пленок Вi осуществляли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Carl Zeiss EVO10 при ускоряющем напряжении 20 кВ. Относительную плотность рассчитывали на основе принципа Архимеда [1].

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены СЭМ-изображения пленок Вi, полученные в гальваностатическом режиме. Видно, что средний размер зерна увеличивается с ростом значения плотности тока от 10 до 25 мА/см². Слоистая зеренная структура становится заметна при осаждении при плотности тока 20—25 мА/см². Так, при увеличении плотности тока в 2 раза (от 10 до 20 мА/см²) средний размер зерна увеличивается почти в 2,5 раза (от 1—3 до 4—7 мкм). Зерна имеют четкую текстуру, характерную для электроосажденных пленок Вi [2]. Объяснением возникновения текстурирования может быть наличие аккомодационного укрупнения зерен (субзерен) основного текстурного компонента. Этот механизм может объяснить формирование текстуры крупнозернистой пленки, в которой крупные зерна состоят из субзеренных блоков (рис. 1, в, г). Результаты химического состава подтверждают отсутствие примесей в пленках Вi (рис. 1, г).

Расчеты относительной плотности показали, что наиболее плотные пленки Вi получаются при электроосаждении при плотности тока 10 мА/см². Относительная плотность увеличивается от 96,8 до 98,6 % с ростом плотности тока. Однако скорость осаждения при 10 мА/см² значительно ниже, чем при 25 мА/см² из-за ограничения кинетическими процессами при синтезе [2].

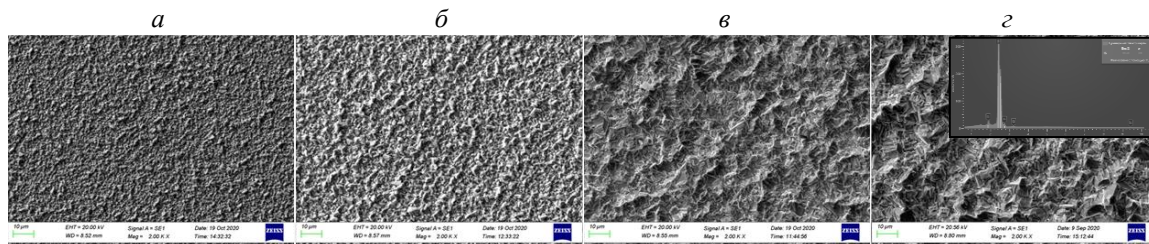


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности пленок Вi, электроосажденных из перхлоратного электролита в гальваностатическом режиме при плотности тока 10 мА/см² (а), 15 мА/см² (б), 20 мА/см² (в) и 25 мА/см² (г). На вставке — спектры энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии пленки Вi (г)

Для изучения влияния импульсного осаждения на микроструктуру пленок Bi была выбрана плотность тока 15 А/см² и исследованы три основных режима: короткий импульс, средний импульс и длинный импульс (рис. 2).

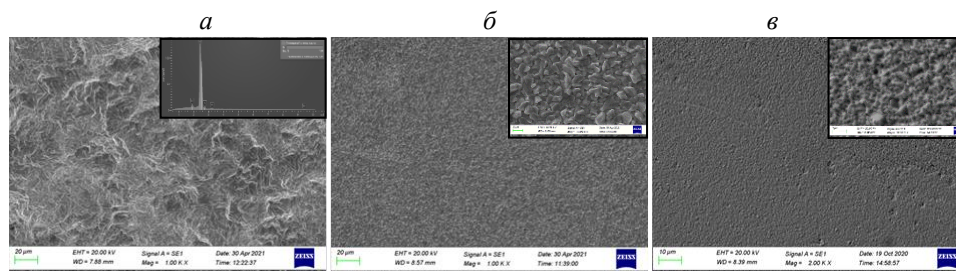


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности пленок Bi, электроосажденных при плотности тока 15 А/см² и следующих импульсных режимах: длинный импульс (а), средний импульс (б), короткий импульс (в). На вставках — спектры ЭРС пленки Bi (а), увеличенные СЭМ-изображения пленок Bi (б и в).

Результаты СЭМ показывают, что при уменьшении длительности импульса от 1 с до 20 мкс наблюдается существенное изменение среднего размера зерна и микроструктуры пленок. Средний размер зерна становится 300—700 нм при уменьшении величины импульса до короткого диапазона (20 мкс). Обращает на себя внимание тот факт, что относительная плотность пленок Bi увеличивается с 97,9—99,1 % при уменьшении длительности импульса от 1 с до 20 мкс.

Выводы. Таким образом, показано, что, варьируя режимы электроосаждения, можно получать пленки Bi с регулируемой микроструктурой и относительной плотностью, что наиболее важно для изготовления радиационных экранов, где плотность является ключевым параметром.

1. The mechanical properties of W–Cu composite by activated sintering / P. Chen [et al.] // The International Journal of Refractory Metals and Hard Materials (IJRMHM). – 2013. – Vol. 36. – P. 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.09.001>
2. Early-Stage Growth Mechanism and Synthesis Conditions-Dependent Morphology of Nanocrystalline Bi Films Electrodeposited from Perchlorate Electrolyte / D. Tishkevich [et al.] // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10, № 6. – P. 1245. <https://doi.org/10.3390/nano10061245>

ПРИМЕНЕНИЕ CTS В ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

К.П. Бускис¹, А.В. Кобыляцкий¹, А.С. Мусаелян²

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь; konsbus@gmail.com

²Институт радиофизики и электроники НАН РА, Аштарак, Армения

Тонкоплёночные солнечные элементы изготавливаются на основе теллурида кадмия (CdTe) и селенида меди, индия, галлия (CIGS). Производство CIGS зависит от редкоземельных элементов, что ограничивает их повсеместное применение и увеличивает итоговую стоимость продукта. Тонкоплёночные элементы на основе CdTe также весьма дороги в производстве ввиду редкости кадмия, к тому же он является токсичным элементом. По этой причине проводятся исследования других соединений, подходящих для применения в тонкоплёночных солнечных элементах.

В настоящее время ведутся исследования по применению Cu₂SnS₃ (CTS) в тонкоплёночных солнечных элементах. Данное соединение нетоксично и имеет более низкую стоимость по сравнению с применяемыми в настоящее время материалами. CTS представляет собой полупроводник *p*-типа, с высоким коэффициентом поглощения ($\sim 10^4$ см⁻¹) и шириной запрещённой зоны ~ 1.1 — 1.5 эВ, что очень хорошо согласуется со спектром солнечной энергии для максимального преобразования солнечной энергии в электрическую. Однако, есть существенный недостаток — коэффициент полезного действия тонкоплёночных элементов на основе CTS является намного более низким, чем у элементов на основе CdTe и CIGS. Достигнутая эффективность преобразования энергии для тонкоплёночных элементов на основе CTS на данный момент составляет ~ 4 — 6 %, в то время как у вышеупомянутых аналогов она составляет 22,1 % и 23,4 % соответственно [1].

Схематическая структура тонкоплёночного солнечного элемента CTS показана на рис. 1. Для нанесения тонкоплёночного солнечного элемента CTS в качестве основы используется стеклянная подложка. Тонкая пленка молибдена (Mo) толщиной от 1,2 до 1,5 мкм распыляется на стеклянную подложку в качестве омического контакта [2].

Нанесение слоёв выполняется с помощью различных методов осаждения. Применяются как вакуумные, так и невакуумные методы напыления. Достигнутые на данный момент результаты синтеза приведены в табл. 1 [3].

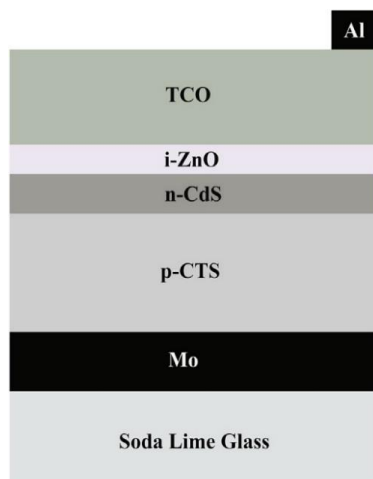


Рис. 1. Принципиальная схема тонкоплёночного солнечного элемента CTS [2]

Таблица 1. Параметры образцов CTS, изготовленных различными методами напыления

Метод нанесения	Условия сульфуризации	КПД (%)	U_{xx} (мВ)	I_{oc} (мА/см ²)	FF (%)	Морфология поверхности
$2 \cdot 10^{-3}$ мбар Последовательное осаждение слоёв Sn и Cu	350 °C, 400 °C, 520 °C, 10 мин	—	—	—	—	Грубая поверхность с малым размером зёрен
0,5 Па Со-осаждение слоёв Sn и Cu	GeS ₂ , S ₅ 50 °C 5 мин	6,01	355	30,5	55,6	Большой размер зёрен (~мкм)
50 Вт, 0,8 Па Последовательное осаждение слоёв Sn и Cu	560 °C 2 часа	—	—	—	—	Гладкая и компактная поверхность
4,2 Вт·см ⁻² Последовательное осаждение слоёв Sn и Cu	От 400 °C до 550 °C 20 мин	0,28	183	5,45	26,1	Размер зёрен увеличивается с повышением температуры
4,2 Вт·см ⁻² Последовательное осаждение слоёв Sn и Cu	575 °C От 5 до 30 мин	0,20	197	3,60	26,1	Плотная поверхность
4,2 Вт·см ⁻² Последовательное осаждение слоёв Sn и Cu	570 °C 20 мин	0,76	215	13,8	25,5	Трещины и поры уменьшаются с увеличением продолжительности предварительного нагрева
Практическое со-осаждение слоёв Sn и Cu	520 °C 560 °C 1 час	3,05	243	26,2	47,9	Компактная с большим размером зёрен

В настоящее время применение CTS в тонкоплёночных солнечных элементах является затруднительным ввиду его низкого коэффициента преобразования энергии, однако, ведётся анализ различных методов вакуумного и невакуумного осаждения для нахождения оптимального способа нанесения покрытия.

Работы была поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № T21APM-003) и Комитетом Науки МОНКС Республики Армения (грант № 21SC-BRFFR-1C003).

1. Y.T. Zhai, S. Chen, J.H. Yang, H.J. Xiang, X.G. Gong, A. Walsh, J. Kang, S.H. Wei. Structural diversity and electronic properties of Cu₂SnX₃ (X=S, Se): A first-principles investigation // Phys. Rev. B. – 2011 (**84**) – 1–6.
2. E.S. Hossain, P. Chelvanathan, S.A. Shahahmadi, K. Sopian, B. Bais, N. Amin. Performance assessment of Cu₂SnS₃ (CTS) based thin film solar cells by AMPS-1D // Curr. Appl. Phys. – 2018 (**18**) – 79–89.
3. M.F. Islam, N.M. Yatim, P. Chelvanathan, M.T. Ferdaous, M.A. Hashim, A. K. Modak, N. Amin. A critical review of Cu₂SnS₃ (CTS) thin films solar cells // MJoSHT – 2019 (**3**) – 110–118.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ W/Bi₂O₃ ДЛЯ ЭКРАНОВ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

С.А. Герман^{1,2}, Д.И. Тишкевич¹, А.А. Роткович¹, А.А. Бондарук¹, Т.И. Зубарь¹,
А.В. Труханов¹, Е.С. Дашкевич¹

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь;

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Цель. Практически сразу с открытием рентгена в 1895 году была признана опасность его излучения. Для того, чтобы свести эту опасность к минимуму, используется метод экранирования тяжелыми материалами, обладающими высокой плотностью. В этой области самым популярным является Pb, но, из-за его токсичности, применение свинца стараются ограничивать. Перспективным материалом, который может заменить свинец, является вольфрам. Однако он так же очень тугоплавкий и плотный металл, и из-за этого возник интерес в его использовании как материала радиационной защиты [1]. Для спекания зерен вольфрама можно использовать легкоплавкую эвтектику, в качестве которой можно использовать оксид висмута, температура плавления которого 817 °С. Поэтому в данной работе был рассмотрен композиционный материал W/Bi₂O₃, проведена оптимизация технологии получения и изучены морфологические параметры композита.

Материалы и методы. Для синтеза композитов использовали порошки вольфрама марки ПВТ ОСЧ и оксида висмута марки ВМО. При проведении исследований были изучены характеристики образцов композитного материала состава W99%(Bi₂O₃)1% (мас. %), синтезированных при различных температурах 25—2000 °С. Метод изостатического горячего прессования применялся для синтеза композиционных материалов. Способ изостатического горячего прессования состоит в создании высокого давления за счет растекания контейнера высокого давления, которое осуществляется, когда контейнер с образцом сжимается в устройстве из-за торможения растекания закрывающимися краями устройства. Значения высокой температуры устанавливалось путем пропускания электрического тока через систему нагревательных элементов контейнера, который был изготовлен из графитсодержащих смесей с низким сопротивлением, что позволяет получать высокие температуры в небольшом объеме за короткий промежуток времени. Механизм спекания заключается в одновременном воздействии температуры и давления на замкнутый объем. Отличительной особенностью этого метода является то, что нагрев и охлаждение образца происходят под постоянным воздействием высокого давления, что приводит к высокой скорости спекания. В нашем случае спекание образцов осуществляется в течение 3 минут [2].

Исследование морфологии и химического состава полученных композитов проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием Carl Zeiss EVO10 и приставки Oxford Instruments, соответственно. Также был проведен расчет плотностей для каждого из полученных образцов на основе метода гидростатического взвешивания относительно идеальной плотности материала, рассчитанной теоретически. Расчет был проведен исходя из известных справочных данных о плотностях отдельно взятых компонентов композита. Идеальная плотность композита W/Bi₂O₃ из расчета составила 19,05 г/см³.

Результаты и обсуждение. Результаты расчета плотностей полученных материалов приведены в табл. 1. Из полученных данных видно, что наименьшую плотность имеет материал, полученный прессованием при температуре 2000 °С. Анализ СЭМ фотографий (рис. 1) выявил следующие особенности микроструктуры образцов, полученных при разных условиях синтеза: наблюдается тенденция к ухудшению микроструктуры поверхности образцов с повышением температуры.

Морфология образца, полученного при 2000 °С, пористая, тогда как структура образца, полученного при 25 °С, более однородная. Вероятно, что вызвано это тем, что при повышении температуры происходит окислительно-восстановительная реакция в среде углерода, сопровождающаяся восстановлением оксида висмута до металла и окислением вольфрама кислородом, вследствие чего на поверхности образцов образуются дефекты. Поэтому в качестве оптимальных условий синтеза однородных высокоплотных композитов рекомендуется использовать значения давлений 5 ГПа и температуру 25—500 °С.

Таблица 1. Результаты проведенных измерений

№ образца	Условия синтеза	Абсолютная плотность, г/см ³	Относительная плотность, %
1	2000 °С, 5 ГПа	16,98	89,14
2	1500 °С, 5 ГПа	17,29	90,78
3	1000 °С, 5 ГПа	17,45	91,60
4	850 °С, 5 ГПа	17,36	91,15
5	500 °С, 5 ГПа	18,10	95,03
6	25 °С, 5 ГПа	17,85	93,72

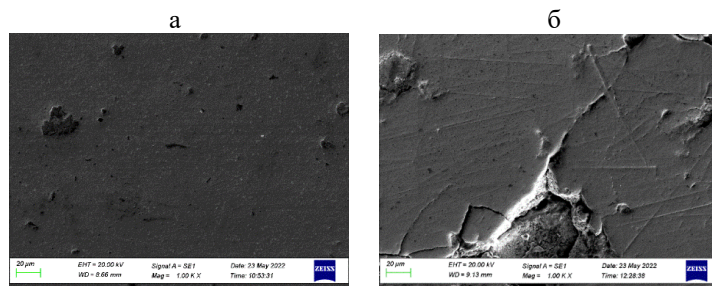


Рис. 1. СЭМ-снимки для образца № 6 (а) и образца № 1 (б)

Выводы. Проведена оптимизация технологии синтеза композиционных материалов на основе W/Bi_2O_3 методом изостатического горячего прессования. Показано, что композиционный материал состава $W99\%(Bi_2O_3)1\%$ является перспективным для использования в качестве материала радиационной защиты. Продemonстрировано, что при соблюдении оптимальных условий с помощью описанной ранее технологии можно получить материал высокой плотности, что является определяющим критерием при выборе материалов радиационной защиты.

1. Беспалов В.И. Лекции по радиационной защите: учебное пособие / В.И. Беспалов; Томский политехнический университет. – 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 695 с.
2. Tishkevich, D.I.; Zubar, T.I.; Zhaludkevich, A.L.; Razanau, I.U.; Verzhinina, T.N.; Bondaruk, A.A.; Zheleznova, E.K.; Dong, S.; Hanfi, M.Y.; Sayyed, M.I.; et al. Isostatic Hot Pressed W-Cu Composites with Nanosized Grain Boundaries: Microstructure, Structure, and Radiation Shielding Efficiency against Gamma Rays. *Nanomaterials* 2022, 12, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНА

Т.А. Глевицкая, А.В. Бильдюкевич, Е.С. Любимова,
Е.А. Назаров, Т.А. Плиско, А.С. Полин

ГНУ «Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь; thliavitskaya@gmail.com

Цель работы — разработка многоканальных ультрафильтрационных мембран на основе полиэфирсульфона (ПЭС) с внутренним селективным слоем, характеризующихся высокой механической прочностью.

Вследствие своих размеров, одноканальные полые волокна считаются хрупкими и достаточно неустойчивыми к нагрузкам, которым они подвергаются во время частых циклов обратных промывок [1, 2]. Для многоканальных волокон возможность их повреждения исключается, так как каждое волокно состоит из 3—7 капилляров, что существенно увеличивает механическую прочность и гарантирует целостность мембран. Для достижения данной цели необходимо было выбрать оптимальные условия для получения высокопроизводительных полволоконных мембран в непрерывном режиме формования. Было проведено исследование зависимости транспортных свойств мембран и их структуры от параметров формования (давления формовочного раствора ($P_{\text{пол.}}$), давления внутреннего осадителя ($P_{\text{ос.}}$), расстояния от фильеры до зеркала приемной ванны (воздушного зазора) (H)), состава и температуры внутреннего осадителя.

Материалы и методы. В качестве мембранообразующего полимера использовали полиэфирсульфон (Китай), растворитель — N,N-диметилформамид (ДМФА, BASF, Германия, степень чистоты 99,8 %), порообразователь и гидрофилизирующий агент.

Семиканальные полволоконные мембраны с внутренним селективным слоем получали методом свободного прядения (сухо-мокрый способ формования) в непрерывном режиме. В качестве внутреннего осадителя использовали воду, а также смеси ДМФА/полиэтиленгликоль ПЭГ-200 ($M_n = 200 \text{ г·моль}^{-1}$, BASF, Германия)/вода и ПЭГ-200/вода.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что независимо от режимов формования использование воды (жесткого осадителя, $CH = 10,6 \text{ г/дл}$) в качестве внутреннего коагулянта не позволяет получить многоканальные полволоконные мембраны с устойчивой структурой: регистрируется мгновенное расслоение внутренних каналов, диаметр которых не превышает 100 мкм. Замена воды на более мягкие внутренние осадители с числами осаждения 28—57 г/дл, напротив способствует образованию единой губчатой и однородной структуры поддерживающего слоя, в которой отсутствуют крупные поры (макроvoidы), рис. 1. Внутренний диаметр каналов таких полволоконных мембран составил 650—910 мкм, а толщина стенки 110—350 мкм. Независимо от режимов формования удельная производительность многоканальных мембран по воде составляет 200—500 $\text{л·м}^{-2}\text{ч}^{-1}$. Установлено, что при увеличении длины воздушного зазора толщина стенки волокна

и внутренний диаметр уменьшаются из-за вытяжки волокна в продольном направлении. Показано, что увеличение давления подачи внутреннего осадителя приводит к росту диаметра внутренних каналов и уменьшению толщины стенки многоканального волокна. Производительность мембран по воде увеличивается при увеличении числа осаждения внутреннего осадителя (при снижении жесткости осадителя), а также при увеличении температуры внутреннего осадителя и температуры приемной ванны с 10—18 до 46—50 °С.

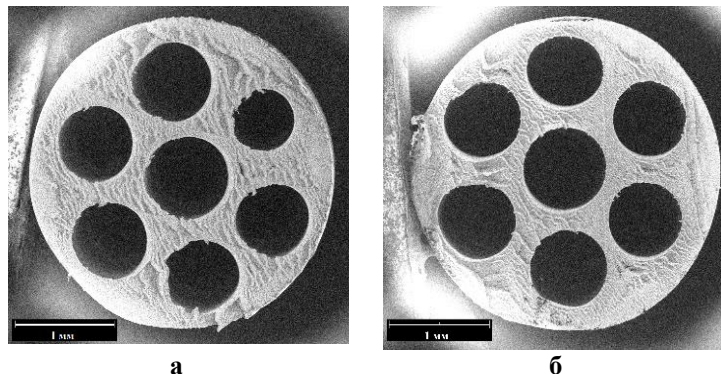


Рис. 1. Структура многоканальных мембран на основе полиэфирсульфона с внутренним селективным слоем: а — внутренний осадитель — ПЭГ-200/вода; б — внутренний осадитель ДМФА/ПЭГ-200/вода

В результате исследования были подобраны оптимальные режимы формирования многоканальных мембран на основе полиэфирсульфона, что позволило получить мембраны с внутренним селективным слоем, губчатой структурой стенки волокна и удельной производительностью по воде 450—500 л·м⁻²ч⁻¹.

1. Wan P., Yin J., Deng B. Seven-Bore Hollow Fiber Membrane (HFM) for Ultrafiltration (UF) / Chem. Eng. Res. and Design. – 2007 (128). 240–247.
2. Back J. O. et all. Poly(piperazine-amide)/PES Composite Multi-Channel Capillary Membranes for Low-Pressure Nanofiltration / Polymers. – 2017, 9, 654.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ

К.В. Ефимчик

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; efim_by@mail.ru

Цель работы — разработка композиционных материалов на основе вторичных полиолефинов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, прочностью, устойчивостью к изменению температуры, воздействию влаги, для применения в изделиях технического назначения.

Материалы и методы. Объектом исследования являются полимерные композиционные материалы (ПКМ), формируемые на основе вторичного полиэтилена низкого давления (ПЭНД), модифицированные песком речным и нефтешламом.

В качестве основного связующего компонента в ПКМ применялся вторичный полиолефин (ПЭНД марки 277-03) с размером частиц 2—5 мм, связующее модифицировали сополимером этилена с винилацетатом (СЭВИЛЕН) с размером частиц 2—5 мм.

В качестве наполнителя используется песок речной (ГОСТ 8736) и нефтешлам — грунт, пропитанный нефтью.

ПКМ готовили путем механического смешивания предварительно просушенного для снижения влажности песка с нефтешламом (до влагосодержания 5 %), затем с базовым связующим (ПЭНД и СЭВА) в лабораторном смесителе марки СЛ-5 (скорость вращения 140 об./мин). Образцы получали после перемешивания компонентов методом термопрессования на вертикальной литьевой машине ПЛ-71 при температуре плавления 180 ± 5 °С и давлении литья 32 ± 1 МПа в виде цилиндров диаметром 35,6 мм и высотой 140 мм.

Для оценки долговечности и физико-механических характеристик изготовленных образцов в реальных условиях эксплуатации проводили предварительные натурные и лабораторные испытания. В лабораторных условиях моделировали интенсивное воздействие солнечного света, дождя, образование конденсата и температурные перепады. Это позволило интенсифицировать процессы старения и разрушения, сэкономить время на исследование образцов.

Испытания проводили в специальном аппарате искусственной погоды (везерометре) Q-SUN Xenon Xe-3HS с ксеноном в ИММС НАН Беларуси.

Испытание материала на сжатие проводили в научно-исследовательской лаборатории «Диагностика, испытание и исследование строительных материалов и конструкций» в УО «БелГУТ» на гидравлическом испытательном прессе Matest C040N.

Результаты и их обсуждение. Получены экспериментальные образцы композитов на основе наполненного модифицированного вторичного полиэтилена. Оптимизированы концентрационные составы композитов по показателю наиболее высокой прочности образцов.

Исследования показали, что наиболее высокая прочность образцов достигается при следующем содержании компонентов, мас. %: вторичный полиолефин — 25, сополимер этилена с винилацетатом — 3, нефтешлам — 7, песок речной — 65. Составы и характеристики ПКМ приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Состав ПКМ

Компоненты	Концентрация компонентов, мас. %				
	I	II	III	IV	V
вторичный ПЭНД	25	25	25	25	25
СЭВА	1	2	3	4	5
нефтешлам	5	6	7	8	9
песок речной	69	67	65	63	61

Таблица 2. Характеристика ПКМ

Характеристика	Состав композита				
	I	II	III	IV	V
Относительное удлинение, %	296	302	310	327	340
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	4,9	5,3	5,7	5,4	5,1
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	41,5	42,1	42,9	42,3	42

Результаты испытаний свидетельствуют о возможности применения данного материала в качестве конструкционного.

По результатам проведенных исследований разработан проект дорожного настила размером 500×1000×40 мм, весом 25 килограмм. Применение разработанного дорожного настила не требует специальных приспособлений, навыков и использования специальной грузоподъемной техники (погрузка, выгрузка и укладка может производиться вручную).

Для обоснования экономической целесообразности проведенных исследований были проведены расчеты по укладке площадки площадью 100 м². Для укладки такой площадки необходимо 200 плит размером 1,0×0,5×0,05 м, весом 25 кг каждая из разработанного материала или 38 плит ПП18.15-30 из бетона размером 1,75×1,50×0,16 м, весом 1030 кг каждая (минимальный размер дорожной плиты). Экономический эффект при укладке плит из разработанного материала, по сравнению с бетонной составляет 684,56 руб. на каждые 100 м².

На рис. 1 представлены варианты применения дорожного настила.

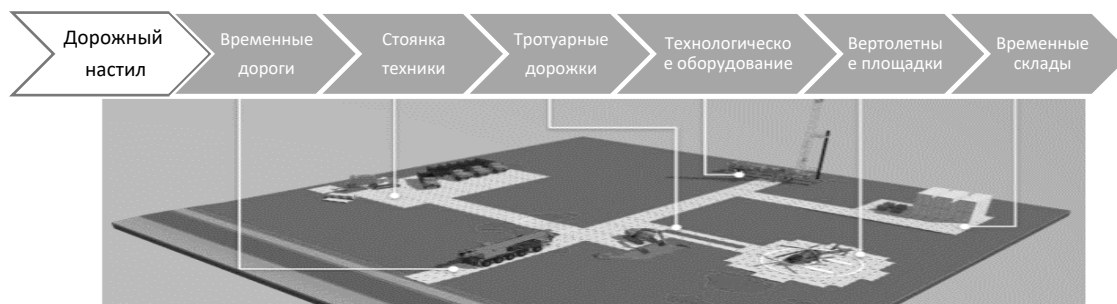


Рис. 1. Варианты укладки дорожного настила

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что на основе наполненного модифицированного вторичного ПЭНД можно получить ПКМ с приемлемыми физико-механическими характеристиками для изготовления различного рода конструкционных элементов.

1. Поддубный, А. А. Изготовление элементов дорожных настилов из композиционных материалов на основе полиолефинов и нефтешламов / А. А. Поддубный, О. А. Ермолович, К. В. Ефимчик // ВЕСТНИК БелГУТа: НАУКА И ТРАНСПОРТ. – 2020. – № 1 (40). – С. 62–63.

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СПЛАВ Zn-Ni-ОКСИД-ПОЛИМЕР

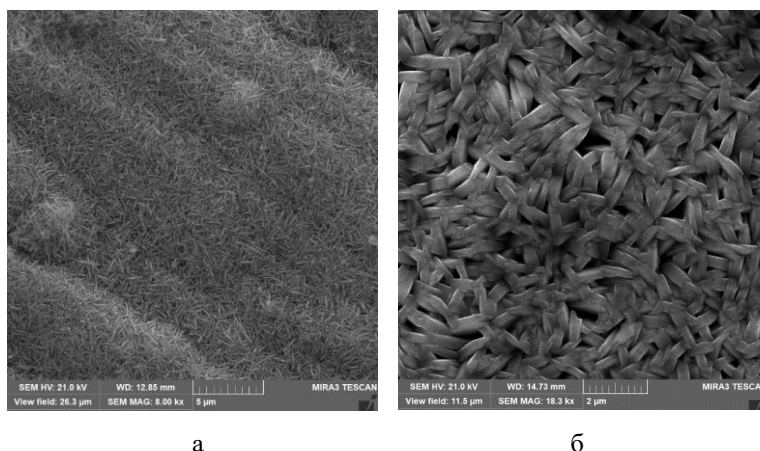
Д.В. Зиневич

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

Основным видом покрытий, применяемым для защиты от коррозии стальных деталей в широком диапазоне морских условий эксплуатации, является кадмиевое покрытие. Однако вследствие высокой токсичности соединений кадмия необходима его замена [1]. На данный момент ни одно коррозионностойкое металлическое покрытие по защитной способности в среде хлоридов не могло сравниться с кадмиевым, особенно, при наличии в покрытии сквозных пор до стальной основы, царапин, сколов и т.п. дефектов. Поэтому разработка анодного покрытия взамен кадмиевого является весьма актуальной. Актуальным для замены кадмиевого покрытия является использование цинковых композитных материалов с анодной защитой [2, 3] и полимерных покрытий [3].

Технологичность процесса получения электрохимического цинкового покрытия, низкая стоимость и высокая коррозионная стойкость обеспечивает их широкое использование в машиностроении. Дополнительное изменение коррозионной стойкости цинковых покрытий обеспечивает химическая обработка поверхности в растворе на основе шестивалентных солей хрома [4]. Образующаяся конверсионная хроматная пленка не смотря на малую толщину увеличивает стойкость покрытия в среде солевого тумана на 100 часов [4]. Последующее увеличение коррозионной стойкости цинковых покрытий достигается как нанесение дополнительных слоев полимера. Повышением собственных коррозионной стойкости цинка при его легировании железом, никелем и т.д. [5] Хроматные пленки имеют развитый микрорельеф и могут быть использованы в качестве подслоя для нанесения слоя полимера, повышающего коррозионную стойкость хроматной пленки [4].

Цинк-никелевые покрытия имеют развитый микрорельеф поверхности «рис. 1, а». В микроскопическом масштабе с характерным размером в 5 мкм микрорельеф образован округлыми игольчатыми частицами, формирование слоя из хроматов цинка и никеля не приводит к изменению морфологии поверхности цинковых покрытий «рис. 1, б».



а

б

**Рис. 1. Микрорельеф цинк-никелевого покрытия: а — без обработки;
б — после обработки в растворе хроматирования**

Нанесение слоя поливинилового спирта сглаживает микрорельеф на поверхности покрытия. Воздействие 10 % раствора кислоты на поверхность цинкового покрытия с хроматным слоем приводит к растворению цинкового покрытия в момент контакта капли с поверхностью.

Методом электронной сканирующей микроскопии изучен процесс формирования покрытий полимер-оксид-цинк-никель «рис. 2».

Цинк-никелевое покрытие наносили из хлоридного электролита. Концентрация никеля в покрытии 0,9—1,1 %. Плотность тока варьировали в интервале 15—40 мА/см². Хроматную пленку наносили из раствора бихромата натрия (10 г/л). Полимерные покрытия наносили из раствора поливинилового спирта.

Взаимодействие капли соляной кислоты с полимерными покрытиями нанесенными из 3,6,12 массовых % растворов поливинилового спирта отмечается после 1,1,2 секунды соответственно контакта капли кислоты с поверхностью, а интенсивность газовой выделения возрастает с увеличением длительности контакта кислоты с покрытиями осажденными из 6,12 массовых % растворов поливинилового спирта.



Рис. 2. Микрорельеф композитного покрытия цинк-никель-оксид-полимер

Анализ морфологии поверхности покрытия из раствора поливинилового спирта показывает, что увеличение концентраций поливинилового спирта в растворе приводит к увеличению толщины покрытия. Поливиниловый спирт вне зависимости от его концентрации в растворе смачивает поверхность цинкового покрытия и формирует пленки в зависимости от концентраций поливинилового спирта в видимых микрорельефах и на поверхности гальванического покрытия (6,12 массовых % поливинилового спирта)

Характер развития взаимодействия газовой выделения капли кислоты с поверхностью показывает, что разрушение пленок поливинилового спирта происходит в местах микротрещин, а образование водорода приводит к разрушению (отслоениям) пленки от покрытия. Тем не менее применение растворов поливинилового спирта позволяет усилить эффект хроматирования вследствие слияния пористости хроматного слоя. Увеличение коррозионной стойкости пленки формирующих 6 и 12 массовых % раствора поливинилового спирта обусловлено слиянием их дефектности.

1. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. / Под ред. проф. В.Н. Кудрявцева. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Глобус. 2002. 352 с.
2. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Дёмин С.А. Пути решения проблемы замены кадмиевого покрытия // Гальванотехника и обработка поверхности. 2018. Том 26, № 2. С. 13–25. doi: 10.47188/0869-5326_2018_26_2_13
3. Жирнов А.Д., Каримова С.А., Овсянникова Л.В., Губенкова О.А. Новые защитные покрытия для стальных деталей вместо кадмиевых // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 1. С. 21–24. Jirnov A.D., Karimova S.A., Ovsyannikova L.V., Gubenkova O.A. New protecting covers for steel details instead of cadmic // Metallurgical science and thermal processing of metals. 2003. № 1. pp. 21–24
4. Федосова Н.Л. Антикоррозионная защита металлов. – Иваново, 2009. – 187 с.
5. Семенчиков В.В., Салахова Р.К., Тюриков Е.В., Ильин В.А. Защитные и функциональные гальванические покрытия // Авиационные материалы и технологии. 2012. С. 335–342

ВЛИЯНИЕ ГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЭКРАНА НА ЕГО ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА

О.Д. Канафьев, В.А. Федькин, А.Н. Котельникова, Т.И. Усович, М.И. Панасюк

Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

Введение. В настоящее время актуальной задачей является создание эффективной защиты чувствительных элементов приборов и аппаратуры различного назначения.

Цель работы — исследовать эффективность экранирования постоянных магнитных полей однослойными экранами цилиндрической формы, а также сравнить результаты теоретического расчета эффективности экранирования бесконечного цилиндрического экрана и данных, полученных в реальных условиях.

Материалы и методы. Объектом исследования в данной работе являлся алюминиевый цилиндр, на который наносилось однослойное экранирующее покрытие $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ методом электрохимического осаждения. Длина цилиндра составила 32 см, диаметр 4,5 см.

Подготовка поверхности алюминия проводилась в несколько этапов: обработка трихлорэтиленом, обезжиривание венской известью, химическое травление, химическое цинкование. Далее наносился подслои меди для увеличения адгезии.

Синтез экранирующего покрытия осуществлялся при температуре 35—40 °С из электролита с использованием никелевых анодов. Плотность тока составила 25 мА/см². Толщина полученного экранирующего покрытия равнялась ~ 100 мкм. От полученного образца 7 раз отрезали по 4 см, затем при каждом значении длины измерялась эффективность экранирования. Эффективность экранирования изучалась с помощью полеобразующей системы трехкоординатных катушек Гельмгольца.

Результаты и их обсуждение. Суть принципа экранирования магнитного поля ферромагнитным материалом заключается в замыкании силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку. Исходя из данного подхода, эффективность экранирования постоянна и прямо пропорциональна значениям магнитной проницаемости материала экрана и обратно пропорциональна площади его поперечного сечения [1]. Для бесконечного цилиндрического экрана расчет эффективности экранирования проводят по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{цил}} = 0,57\mu d/r, \quad (1)$$

где μ — магнитная постоянная, d — толщина экрана, мм; r — внешний радиус, мм.

В теоретических расчетах эффективности экранирования обычно используют идеальные геометрической формы образцов (бесконечная плоскость и бесконечный цилиндр, сфера) [2]. В реальных условиях экранируемые поверхности имеют конечные размеры, неправильную форму и могут содержать отверстия и апертуры. Исходя из этого для практических целей необходимо знать, как размер экрана влияет на максимальную эффективность экранирования ($\mathcal{E}_{\text{мах}}$).

Для определения достоверности формулы (1) измерялась с шагом в 4 см эффективность экранирования при длине цилиндра $l_{\text{цил}} = 6\text{—}30$ см. Полученные результаты эффективности экранирования в зависимости от длины цилиндра представлены на рис. 1. На рис. 1 видно, что значение эффективности экранирования изменяется незначительно при уменьшении длины цилиндры до 14 см. При последующем уменьшении длины цилиндра от 14 до 6 см происходит резкое снижение эффективности экранирования.

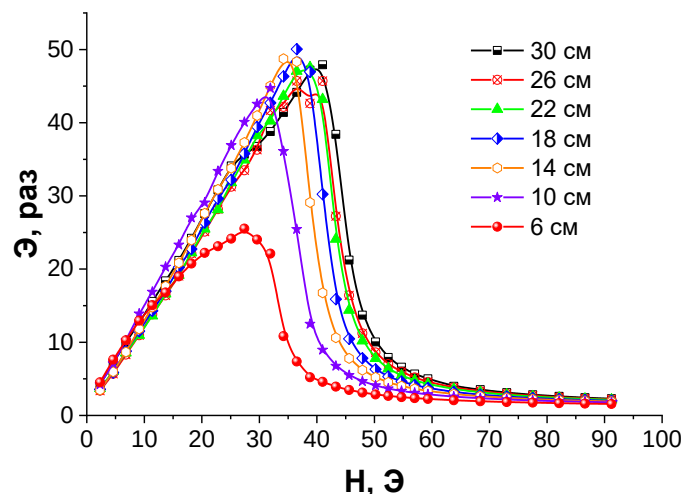


Рис. 1. Эффективность экранирования в зависимости от длины цилиндра

Выводы. Проведены исследования эффективности экранирования алюминиевого цилиндра с экранирующим покрытием $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Было установлено, что данные, полученные в реальных условиях, не соответствуют теоретическим расчетам эффективности экранирования.

Значение параметра $\mathcal{E}_{\text{мах}}$ стабильно при значениях $l_{\text{цил}} \geq 18\text{—}20$ см, таким образом, максимальные значения эффективности экранирования полученного образца держатся в пределах 45—50 раз. Уменьшение длины цилиндра до значения $l_{\text{цил}} < 15$ см приводит к значительному снижению максимума эффективности экранирования от 42 до 25 раз.

Результаты, полученные в ходе эксперимента, связаны с эффектом затекания магнитного поля в открытый образец конечного размера. Поэтому для снижения влияния размерного эффекта цилиндрических и близких к ним по форме экранов необходимо соотношение $l/r \geq 8\text{—}9$.

Для расчета эффективности экранирования реальных цилиндрических экранов и получения поправочного коэффициента планируется расширить объем проводимых исследований.

1. Аполлонский, С.М. Расчеты электромагнитных полей / С.М. Аполлонский, А.Н. Горский. — М.: Маршрут, 2006. — 992 с.
2. Reutov, Yu.Ya. Physical interpretation of magnetostatic shielding / Yu.Ya. Reutov // Russ. J. Nondestruct. Test. — 2000. — Vol. 36. — P. 117–126.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА

С.Н. Карзан

ГНУ Физико-технический институт НАН, Минск, Беларусь

На данный момент, графит является одним из перспективных материалов для использования в промышленности и медицине, однако повсеместное его использование затруднено из-за его низкой реакционной способности.

С целью увеличения реакционной способности графита, за счет создания на его поверхности кислородных групп, была проведена электрохимическая обработка графита (со снятием ЦВА) в 2М водном растворе гидроксида калия при различных скоростях развертки и количествах циклов (от 2 до 250 циклов).

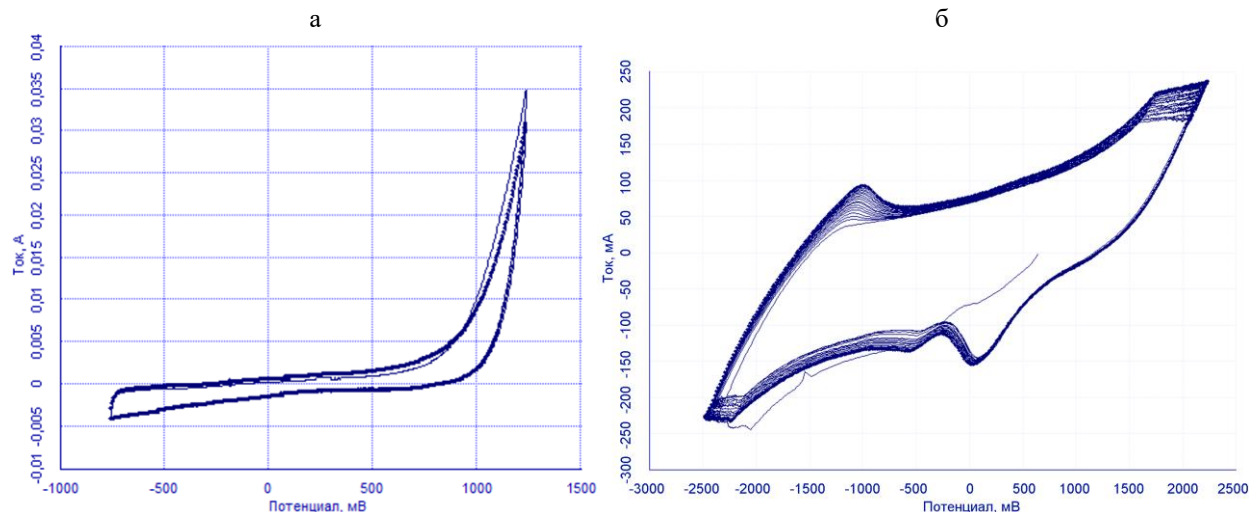


Рис. 1. а — Скорость развертки 0,005 В/с 2 цикла, б — скорость развертки 1 В/с 150 циклов

Благодаря последовательному увеличению скорости развертки и количеству циклов проработки, протекающие электрохимические реакции создают гидроксильные группы на поверхности графита.

Модификация поверхности графита кислородными группами повышает реакционную способность графита, что позволяет использовать его в широком диапазоне отраслей промышленности и медицине, так как в материал не вносятся потенциально опасных для человека веществ.

1. Osswald S. Control of SP²/SP³ carbon ratio and surface chemistry of nanodiamond powders by selective oxidation in air / S. Osswald, G. Yushin, V. Mochalin [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2006. – Vol. 128, Iss. 35. – P. 11635–11642.
2. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. — М.: Химия. — 1971
3. de Jong, K.P. Carbon nanofibers: catalytic synthesis and applications / K.P. de Jong, J.W. Geus // Catal. Rev. – Sci. Eng., 2000. – V. 42, № 4. – P. 481–510.
4. N-Doped Carbon NanoWalls for Power Sources / N. Suetin [et al.] // Scientific Reports, 2019. – Vol. 9, iss. 1. – P. 6716.
5. Graphene-based electrochemical supercapacitors / S.R.C. Vivekchand [et al.] // J. Chem. Sci. Indian Academy of Sciences, 2008. – V. 120. – P. 9–13.

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ТОКИ В НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

М.А. Коваленко

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

Полилактид (ПЛА) — в последнее время один из самых востребованных биоразлагаемых, биосовместимых полимеров. Известно [1], что добавление в полимер небольшого количества (до 1,5 масс) нанодисперсного монтмориллонита приводит к повышению эффективной поверхностной плотности заряда, а также увеличению его стабильности. Поскольку полилактид широко применяется в медицине, а электретный заряд стимулирует многие биологические процессы, изучение электретного эффекта в полимерных нанокompозитах на основе ПЛА и монтмориллонита является перспективным направлением.

Цель работы — изучить электретные свойства композиционного материала на основе полилактида, наполненного монтмориллонитом и подвергнутого обработке в коронном разряде.

Материалы и методы. Для приготовления экспериментальных образцов применяли полилактид в виде гранул размером 3 мм. Путем экструзии гранулы смешивали с порошкообразным наполнителем — монтмориллонитом, в различной пропорции (0, 0,5, 1 и 3 мас. %. Методом горячего прессования из полученных наполненных ненаполненных гранул изготавливали плёнки толщиной 200 мкм. Плёнки выдерживали при температуре 100 °С в коронном разряде в течение 15 минут при напряжённости поля 1 кВ/см. Для изучения зарядовых характеристик образцов применяли метод термостимулированной деполяризации, заключающийся в нагреве плёнки (диапазон температур 20—200 °С) и измерении термостимулированных токов (ТСТ), протекающих через образец и электроды.

Результаты и их обсуждение. Обобщённые спектры ТСТ разделены на две группы (рис. 1): 1 — ненаполненные плёнки, 2 — наполненные монтмориллонитом (0,5—3 мас. %).

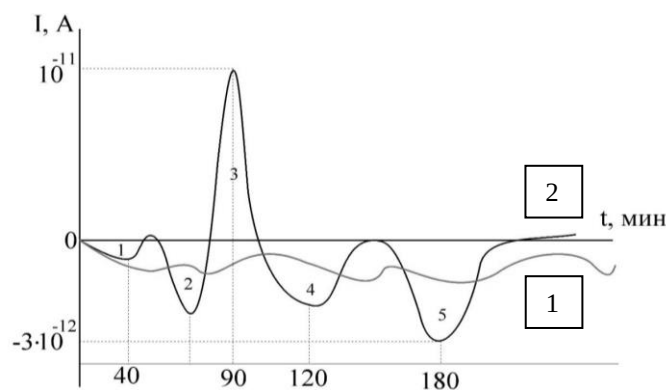


Рис. 1. Обобщённые спектры ТСТ для чистых (1) и наполненных (2) образцов

Видно, что график чистых плёнок, обработанных в коронном разряде, не имеет явных сильно выраженных пиков тока. Значение тока колеблется в пределах от 0 до 10^{-12} А. В наполненных образцах наиболее выражены пики ТСТ при температурах 70, 90, 120 и 180 °С. Величина тока при этом лежит в диапазоне $3 \cdot 10^{-12}$ — 10^{-11} А, причем последний пик наиболее выражен у образцов с содержанием наполнителя 3 %.

Первый незначительный по величине пик тока наблюдается при температуре 40 °С. При этом никаких серьезных структурных изменений в образце не происходит, но, возможно, начинается релаксация накопленного в процессе прессования образцов электростатического заряда. Нужно отметить, что наполненные монтмориллонитом плёнки менее чем чистые подвержены накоплению статических зарядов при их изготовлении.

Пики 2 и 3 лежат в интервале температур 60—90 °С и характеризуются высокими значениями тока. Эта область температур соответствует релаксационным процессам в полилактиде при температуре размягчения (50—54 °С) и температуре стеклования (60—65 °С). Из-за инерционности этих процессов токовые пики проявляются при более высоких температурах.

Наибольшую величину имеет пик тока 5 при температуре 180 °С. Он соответствует температуре плавления кристаллической фазы полилактида (170—180 °С).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено:

1) Величины релаксационных пиков ТСТ образцов полилактида, наполненных монтмориллонитом, существенно (иногда на порядок) превосходят токи в чистых образцах.

2) По спектрам ТСТ можно судить о релаксационных переходах в наполненном полилактиде, температурные интервалы в котором могут быть смещены по отношению к чистому полилактиду.

1. Коваленко М.А. Методологические особенности формирования электростатического заряда в полимерных плёнках, содержащих нанодисперсный наполнитель // Материалы IX Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники». – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – С. 62–64

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНАЯ СМОЛА — КОЛЛОИДНЫЙ ДИОКСИД КРЕМНИЯ

П.А. Костюкевич

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

Повышение физико-механических показателей и эксплуатационных характеристик изделий может быть достигнуто введением в полимер наполнителей в виде дисперсных, ультрадисперсных частиц металлов, по-

лимеров, оксидов и т.д. Введение наполнителя в полимер осуществляется различными технологическими приёмами — экструзией, компактированием, смешением в жидком состоянии и т.д. Образующееся, в результате, искусственное сочетание нескольких исходных компонентов (материалов) относится к композиционным материалам. К композиционным материалам может быть отнесён и материал, дисперсная фаза которого формируется в полимерной матрице в результате химических реакций (поликонденсации) прекурсора дисперсной фазы с компонентом дисперсионной среды. В этом технологическом варианте размеры частиц дисперсной фазы будут определяться условиями протекания нескольких последовательных химических реакций взаимодействия прекурсора дисперсной фазы с компонентами дисперсионной среды на основе полимера.

Методами рентгеновского фазового анализа, электронной сканирующей микроскопии изучен и процесс формирования композиционного материала полимер (фенолформальдегидная смола) — коллоидный диоксид кремния в реакционной системе фенолформальдегидная смола — тетраэтилортосиликат — этанол — вода.

Установлено, что увеличение вязкости раствора и образование золя происходит в течении 24 часов после совмещения компонентов раствора. После 24—48 часов в золе образуются сгустки геля, а после 48—96 часов исходный раствор переходит в гель. Термообработка геля при 335К сопровождается изменением его массы и образованием твёрдой фазы. Превращение геля в твёрдую фазу не приводит к изменению фазового состояния образующегося композиционного материала (рис. 1). Диоксид кремния присутствует в геле и твёрдой фазе в виде наноразмерных, аморфных частиц (рис. 1). Образующийся после термообработки геля, композиционный материал полимер — диоксид кремния имеет гетерогенную структуру, состоящую из прослоек полимера и прослоек полимера с округлыми частицами второй фазы (рис. 2).

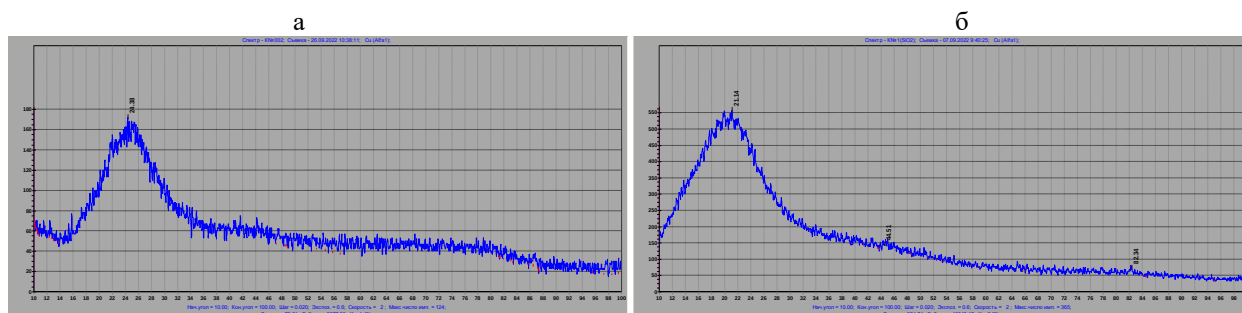


Рис. 1. Рентгенограммы композиционного материала полимер — диоксид кремния:
а — после термообработки при 335К; б — до термообработки

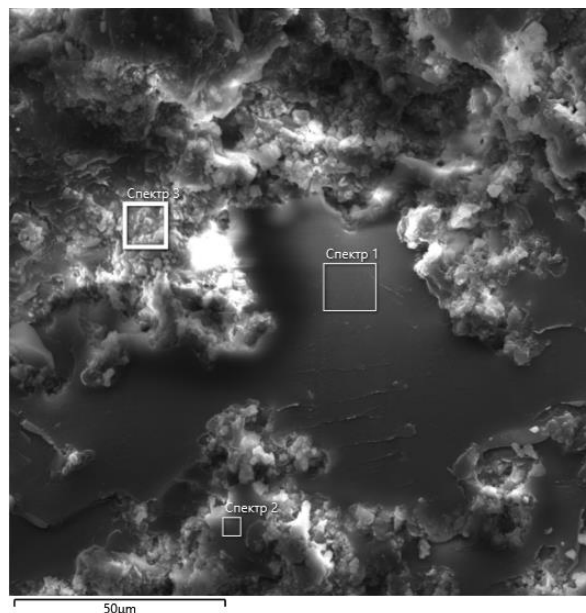


Рис. 2. Морфология поверхности композиционного материала полимер — диоксид кремния

Кремний присутствует как в прослойках полимера, так и частицах второй фазы (рис. 2, табл. 1). Высокое содержание углерода в частицах второй фазы, форма этих частиц даёт основание считать, что они представляют собой агломераты из ультрадисперсных частиц диоксида кремния и прослоек полимера. Структура композиционного материала полимер — диоксид кремния, характер изменения вязкости дисперсионной среды

показывают, что гидролиз тетраэтилортосиликата начинается в четырёхкомпонентном растворе и приводит к образованию золя диоксида кремния в течение 24 часов после совмещения компонентов раствора. Последующее расслоение золя обусловлено образованием геля в виде сгустков, состоящих из коллоидных частиц диоксида кремния в растворе на основе фенолформальдегидной смолы и этанола, и золя из фенолформальдегидной смолы, тетраэтилортосиликата, этанола и воды. Термообработка «эмульсии» приводит к испарению этанола (воды) и расслоению на микрообъёмы фенолформальдегидной смолы и микрообъёмы из агломератов из диоксида кремния и прослоек фенолформальдегидной смолы в матрице из фенолформальдегидной смолы. Образующийся в результате композиционный материал наследует структуру «эмульсий» (рис. 2). Присутствие в прослойках фенолформальдегидной смолы кремния, даёт основания полагать, что и прослойки представляют собой композиционный материал полимер — диоксид кремния (рис. 2, табл. 1).

Таблица 1. Элементный состав участков композиционного материала полимер-диоксид кремния

Метка спектра	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3
C	71.79	68.52	50.19
O	19.11	21.95	31.59
Si	0.24	2.46	10.83
Cu	8.85	7.08	7.39
Всего	100.00	100.00	100.00

Таким образом, формирование структуры композиционного материала фенолформальдегидная смола — диоксид кремния протекает в несколько стадий: образование золя, его перехода в гель и расслоение эмульсии. Образующийся при последующей термообработке эмульсии композиционный материал наследует её структуру.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНО-РЕВЕРСНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ СПЛАВОВ NiFe

А.Н. Котельникова, Т.И. Зубарь, Т. И. Усович, А.А. Бондарук, А.А. Роткович,
М.И. Панасюк, В.А. Федькин, О.Д. Канафьев, А.В. Труханов

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

Введение. Электроосаждённые структуры из сплавов NiFe активно применяются для создания магнитных записывающих головок в устройствах записи и хранения информации, датчиков магнитного поля, компонентов многих микроэлектромеханических систем [1]. Их широкое применение обусловлено высокой магнитной проницаемостью, низкой коэрцитивной силой, близкой к нулю магнитострикцией и значительным магнитосопротивлением. Магнитные свойства плёночных структур в отличие от толстых покрытий и объёмных элементов определяются не только составом сплава и кристаллической структурой, но и коррелируют с микроструктурой поверхности.

Ранее нами было продемонстрировано усиление вертикального роста зёрен и формирование объёмных структур на поверхности плёнки NiFe при смене постоянного и импульсного режима электроосаждения на импульсно-реверсный [2].

Цель исследования — изучить влияние параметров тока на состав, кристаллическую структуру и микроструктуру поверхности плёнок NiFe при импульсно-реверсном электроосаждении.

Материалы и методы. В данной работе плёнки сплава NiFe были получены методом электроосаждения из электролита следующего состава. $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 210 г/л, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 20 г/л, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 15 г/л, H_3BO_3 — 30 г/л, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 60 г/л, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (сегнетова соль) — 30 г/л, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (аскорбиновая кислота) — 2 г/л, $\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_3\text{S}$ (сахарин) — 2 г/л. В качестве подложек для электроосаждения были использованы отполированные стальные пластины, что по окончании синтеза позволило отделить плёнки и исследовать их индивидуально. В течение осаждения температура электролита поддерживалась на уровне 35 °С, а pH поддерживался на уровне 2,2. Плотность катодных и анодных импульсов тока составляла ± 25 мА/см².

Плёнки NiFe синтезировались в импульсно-реверсном режиме электроосаждения. Параметры электроосаждения (длительности паузы, катодного и анодного импульса) представлены в табл. 1.

Для осаждения плёнок с близкими значениями толщины был рассчитан параметр t_{FD} общее время осаждения:

$$t_{FD} = t_{ED} \times \frac{t_C + t_A + t_{off}}{t_C - t_A}, \quad (1)$$

Таблица 1. Технологические параметры получения плёнок NiFe

Образец	Длительность			Общее время осаждения, мин	Эффективное время осаждения, мин
	Катодного импульса, мс	Паузы, мс	Анодного импульса, мс		
P5	100	95	5	126	60
P10	100	90	10	133	60
P25	100	75	25	160	60

где t_{FD} — общее время осаждения, мин; t_{ED} — эффективное время осаждения, мин; t_{off} — длительность паузы, с; t_C — длительность катодного импульса, с; t_A — длительность анодного импульса, с.

Результаты и обсуждение. Химический состав плёнок был исследован методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии. По мере увеличения длительности анодного импульса с 5 до 10 и затем до 25 мс и одновременном сокращении длительности паузы с 95 до 90 и далее до 75 мс наблюдается уменьшение содержания железа в плёнке сплава NiFe с 27,5 до 25,9 и затем до 17,4 ат. %. Это связано с двумя факторами. Во-первых, железо имеет более низкий стандартный потенциал (–0,44 В), чем никель (–0,24 В), что обуславливает большую скорость растворения железа чем никеля в ходе анодных импульсов тока. В то же время анодные импульсы и паузы существенно снижают аномальный характер осаждения и содержание железа в сплаве за счёт вымывания гидроокисей железа из приэлектродного слоя электролита в его толщу.

Исследование кристаллической структуры плёнок методом рентгеноструктурного анализа показало, что все плёнки сформированы из твёрдого раствора железа в никеле (поскольку на дифрактограммах присутствовали лишь пики, соответствующие атомным плоскостям Ni). Помимо этого, было замечено увеличение отношения интегральных плоскостей Ni (200) к (111) по мере увеличения длительности анодного импульса с 95 до 147 и затем до 211 %. Это свидетельствует об преимущественном направлении роста плёнок. Размер областей когерентного рассеяния увеличивается с 6 до 7 и далее до 10 нм для образцов P5, P10 и P25 соответственно.

Микроструктура поверхности плёнок NiFe была исследована методом атомно-силовой микроскопии. Анализ АСМ снимков (см. Рис. 1) показал, что с увеличением длительности анодного импульса t_A с 5 до 10 мс среднеквадратичная R_q шероховатость поверхности увеличивается с 15,1 до 36,7 нм, а при дальнейшем увеличении t_A до 25 мс R_q снижается до 27,9 нм. С увеличением длительности анодного импульса от 5 до 10 мс уменьшается доля мелких (d до 0,8 мкм) зерен и значительно увеличивается доля крупных зерен с d от 1,6 до 2,0 мкм. При максимальной длительности анодного импульса 25 мс наблюдается уменьшение доли площади крупных зерен (d от 1,6 до 2,0 мкм) и одновременное увеличение доли площади мелких и средних зерен (до 1,4 мкм).

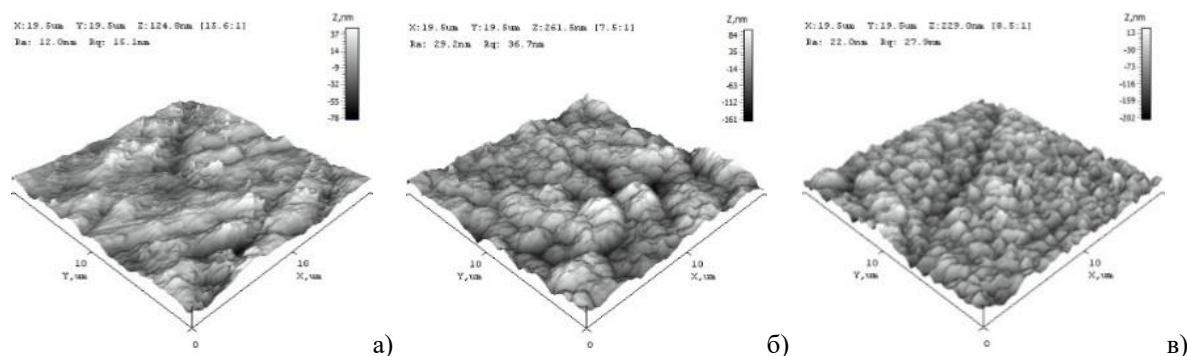


Рис. 1. АСМ снимки поверхности плёнок NiFe: а — P5, б — P10, в — P25

Выводы. Показана возможность формирования плёнок сплава NiFe с различной микроструктурой поверхности путём вариации параметров тока при импульсно-реверсном электроосаждении. Полученные результаты открывают широкие перспективы для контролируемого получения пленок NiFe с желаемыми характеристиками.

1. Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings—A review / V. Torabinejad [et al.] // J. Alloys Compd. – 2017. – Vol. 691. – P. 841–859.
2. Электроосаждение сплавов NiFe при постоянном, импульсном и импульсно-реверсном токе / А. Н. Котельникова [и др.] // Молодежь в науке – 2021 тез. докл. XVIII Междунар. науч. конф. молодых ученых (Минск, 27–30 сентября 2021 г.) В 2 ч. Ч. 2. Физико-технические науки. – 2021. – Vol. 2. – P. 259–262.

ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫЕ ГИДРОГЕЛИ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ АКРИЛАМИДА С АКРИЛОНИТРИЛОМ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

В.А. Карпович¹, А.Д. Шишпор¹, В.Е. Бабуль¹,
Д.Л. Кудрявский², М.Б. Шуляковская¹, Е.В. Гринюк²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; marieshulyakouskaja@gmail.com

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь

Введение. В настоящее время полиэлектролитные гидрогели (ПЭГГ) находят широкое применение в косметической, пищевой промышленности, в сельском хозяйстве, а также в фармацевтической промышленности как суперабсорбенты [1—3]. Традиционный метод получения таких гидрогелей — радикальная полимеризация ионогенных мономеров в присутствии сшивающих агентов. В гораздо меньшей степени используется такой перспективный метод получения ПЭГГ, как фронтальная полимеризация. ПЭГГ на основе акриламида (АА) и акрилонитрила (АН) перспективны для изготовления изделий медицинского назначения, в частности, цервикальных расширителей. Одним из требований, предъявляемым к таким изделиям, является ограниченное набухание в биологических жидкостях организма, позволяющее сохранить целостность изделия при увеличении его размеров.

Цель работы — определение степени набухания и гель-фракций ПЭГГ на основе сополимеров АА и АН, полученных методом фронтальной сополимеризации в присутствии сшивающего агента.

Материалы и методы. Синтез гидрогелей проводили методом ФП АА и АН при различной концентрации мономеров в присутствии персульфата аммония (ПСА) в качестве инициатора и N,N'-метиленисакриламида (МБАА) в качестве сшивающего агента. Соотношение «сомомеры : растворитель» составляло 60 : 40 мол. %. Соотношение АА и АН в реакционной смеси составляло 90 : 10 мол. % АА и 75 : 25 мол. % соответственно. Концентрация МБАА варьировалась от 0,1 до 1,25 мол. %, концентрация ПСА — от 0,1 до 2 мол. %. Степень набухания и величины гель-фракции определяли гравиметрическим методом после выдерживания синтезированных гидрогелей в дистиллированной воде в течение 48 часов при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение. При проведении экспериментов по фронтальной сополимеризации АА и АН было установлено, что ПЭГГ образуются при концентрациях МБАА не ниже 0,5 мол. % при соотношении АА : АН, равном 90 : 10 мол. %, а при соотношении АА : АН, равном 75 : 25 мол. %, ПЭГГ образуются при концентрации МБАА не ниже 1 мол. %. Характеристики полученных гидрогелей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Величины гель-фракции и водопоглощения ПЭГГ, полученных при варьировании концентрации МБАА

МБАА, %	90 мол. % АА : 10 мол. % АН		75 мол. % АА : 25 мол. % АН	
	g, %	α , %	g, %	α , %
0,5	16,3	7200	—	—
1	40,8	3800	37,1	1600
1,25	47,1	3600	45,3	1400

Из табл. 1 следует, что с увеличением количества МБАА закономерно снижается водопоглощение ПЭГГ, а также возрастает значение гель-фракции. Наибольшая степень набухания получена при концентрации МБАА 0,5 мол. % (при соотношении АА : АН, равном 90:10 мол. %).

В табл. 2 приведены характеристики ПЭГГ в зависимости от концентрации ПСА.

Таблица 2. Величины гель-фракции и водопоглощения ПЭГГ, полученных при варьировании концентрации ПСА (соотношение АА : АН = 90 : 10)

ПСА, мол. %	g, %	α , %
0,5	44,9	608
1	44,9	646
1,25	47,9	627
2	36,3	1430

Из табл. 2 видно, что с увеличением концентрации инициатора от 0,1 до 0,5 % характеристики гидрогелей практически не меняются, однако при концентрации ПСА 2 % наблюдается небольшое снижение величины гель-фракции и возрастание водопоглощения. Это может быть связано с деструкцией межмолекулярных сшивок, образованных МБАА, из-за высокой концентрации ПСА — таким образом, водопоглощение составило 1430 %.

Выводы. Определены степени набухания и величины гель-фракции ПЭГТ на основе сополимеров АА с АН, полученных методом ФП в присутствии сшивающего агента. Показано, что полученные гидрогели обладают выраженными водопоглощающими свойствами, однако имеют относительно невысокие гель фракции. С целью улучшения характеристик гидрогелей дальнейшие исследования предполагают варьирование природы инициатора, сшивающего агента и растворителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Многофункциональные и композиционные материалы», задание 8.4.2.14 «Разработка методов фронтальной сополимеризации акриловых мономеров в непрерывном режиме».

1. Gavini, E. [et al.] Frontal polymerization as a new method for developing drug controlled release systems (DCRS) based on polyacrylamide // Eur. Polym. J. – 2009 (45), 690–699.
2. Wang, F.-X. [et al.] Rapid preparation of auto-healing gels with actuating behavior // Soft Matter. – 2019 (15), 2517–2525.
3. Rudzinski, W.E. [et al.] Hydrogels as controlled release devices in agriculture // Des. Monomers a. Polymers. – 2002 (15, № 1), 39–65.

ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПРОТОНИРОВАНИЕ ПОЛИАНИЛИНА В МАТРИЦЕ ПОЛИЛАКТИДА

С.Н. Лемешонок, Х.А. Новик, Е.Е. Шумская, А.А. Рогачев

Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь; lemeshonoksn@gmail.com

Полианилин (ПАНИ) является представителем класса проводящих полимеров, который отличается простотой синтеза и высокой устойчивостью к условиям внешней среды. Формы ПАНИ в зависимости от их степени окисления, допирования, надмолекулярной структуры различаются по цвету, стабильности и электропроводности [1]. Наибольший интерес представляет электропроводящая форма ПАНИ — эмеральдиновая соль, которая образуется при протонировании эмеральдинового основания органическими и неорганическими кислотами [2]. Композиционные материалы, содержащие ПАНИ, находят широкое применение в электронике в качестве гибких аккумуляторов, суперконденсаторов, а также активных элементов сенсоров газа, излучения и др. Биоразлагаемый биосовместимый полимер полилактид (ПЛА) является перспективной матрицей для изготовления электропроводящих материалов различного функционального назначения [3]. Воздействие различных видов излучения, в том числе облучения высокоэнергетичными частицами (электронами и гамма-квантами) на механические, оптические и электрические свойства композитов важная задача в области разработки новых материалов [4].

ПАНИ синтезировали по методике [5]. Для получения эмеральдинового основания сухой порошок полимера обрабатывали 0,1М раствором гидроксида калия, промывали и сушили при 80 °С. Пленку ПАНИ в матрице ПЛА получали методом полива из раствора полимеров в хлороформе (массовое соотношение ПАНИ к ПЛА составило 0,4:1).

Исходная пленка ПАНИ-ПЛА (толщина 40 мкм) имеет насыщенно-фиолетовый цвет, что характерно для непроводящей формы ПАНИ. После 2 ч облучения полным светом ртутной лампы ДРТ-1000 образец принимает темно-зеленое окраску, что соответствует эмеральдиновой соли ПАНИ.

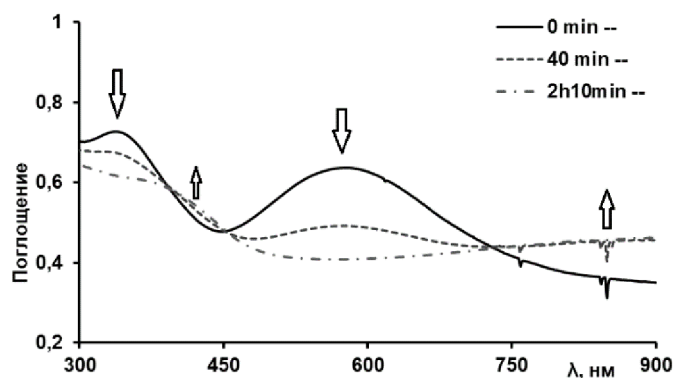


Рис. 1. УФ-вид спектр поглощения пленки ПАНИ-ПЛА до и после УФ-облучения

На рис. 1 представлены спектры поглощения пленки ПАНИ-ПЛА до и после УФ-облучения. Наблюдается уменьшение интенсивности пиков при 340 и 576 нм и увеличение интенсивности поглощения при 420 нм

и в области 800—900 нм. Наличие изобестических точек при 450 и 730 нм свидетельствуют о равновесном переходе двух форм ПАНИ. Предположительно, такой переход возникает в следствие протонирования молекул ПАНИ подвижными атомами водорода карбонильных групп, которые возникают при разрыве макроцепей ПЛА под воздействием УФ-облучения [6].

В работе показана возможность контролируемого фотоиндуцированного протонирования ПАНИ непосредственно в тонкопленочном состоянии под воздействием УФ-облучения, что приводит к изменению оптических и электрофизических свойств всего композиционного материала.

1. Jamadade V.S., Dhawale D.S., Lokhande C.D. Studies on electrosynthesized leucoemeraldine, emeraldine and pernigraniline forms of polyaniline films and their supercapacitive behavior // *Synthetic Metals* - 2010 (160), 955–960
2. Боева Ж.А., Сергеев В.Г. Полианилин: синтез, свойства и применение // *Высокомолекулярные соединения. Серия С.* – 2014 (56), № 1, 153–164
3. Wong P.-Y., Phang S.-W., Baharum A. Effects of synthesised polyaniline (PAni) contents on the anti-static properties of PAni-based polylactic acid (PLA) films// *RSC Adv.* – 2020 (10), 39693–39699
4. Bodugoz-Senturk H., Guven O. Enhancement of conductivity in polyaniline-[poly(vinylidene chloride)-co-(vinyl acetate)] blends by irradiation // *Radiation Physics and Chemistry.*–2011 (№80), 153–158.
5. Liu P. Facile Preparation of polyaniline nanosheets via chemical oxidative polymerization in saturated nacl aqueous solution for supercapacitors // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2012 (7), 6134–6141
6. Тертышная Ю.В., Подзорова М.В. Влияние ультрафиолетового излучения на структурно-динамические характеристики полилактида и его смесей с полиэтиленом // *Химическая физика.* – 2020 (39) № 1, 57–65

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ СТАНЦИЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЬМАТИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Манкевич¹, А.Т. Волочко¹, А.А. Мечай²

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

В Республике Беларусь не решён вопрос утилизации отходов станций обезжелезивания. При этом на территории страны эксплуатируется более 600 станций обезжелезивания. Согласно официальным данным, образование осадка станций обезжелезивания в стране составляет до 300 т в пересчете на сухой осадок. Отходы осадков станций обезжелезивания направляются на полигоны для захоронения (в 75 % случаев) или на шламовые накопители, принадлежащие водоканалам, для долговременного хранения (в 25 % случаев) [1, 2]. Анализ научной информации показывает, что в настоящее время не существует универсального метода обработки и утилизации шламовых осадков [3].

Цель исследования — определение возможности использования отходов станций обезжелезивания после химической обработки при получении кольматирующей добавки для производства изделий из бетона.

В процессе исследований определяли влияние кольматирующей добавки на свойства получаемых цементных композиций, а также влияние добавки на процесс водопоглощения. Практическая часть заключалась в использовании результатов работы для получения строительных изделий.

Перспективность утилизации промышленных отходов связана с тем, что соединения железа находят устойчивое применение в качестве функциональных добавок — кольматирующих компонентов, восстановителей хрома (VI). Известно, что добавки сульфата железа повышают водонепроницаемость бетона на 2—3 марки.

Основным компонентом шлама станций обезжелезивания является трехвалентное железо в виде хлопьевидного (аморфного) гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, о наличии которого свидетельствует насыщенная коричневая окраска. В шламах станции обезжелезивания содержание Fe_2O_3 находится в пределах 28—33 %. На основе этого неорганического отхода в лабораторных условиях был получен раствор сульфата железа, а также проведены исследования его влияния в качестве добавки на: физико-механические свойства и водопоглощение цементного камня. Показано, что с увеличением дозировки раствора сульфата железа увеличиваются сроки схватывания цемента. Для контрольного образца начало схватывания — 3ч, для состава с дозировкой добавки 0,3 мас. % — 3 ч 20 мин, 0,5 мас. % — 3 ч 30 мин, 0,8 мас. % — 4 ч, 1 мас. % — 4 ч 35 мин, 1,5 мас. % — 4 ч 50 мин. Данный эффект обусловлен взаимодействием $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием дополнительного гипса, а затем и железозамещенного этtringита.

Далее было показано, что добавление раствора сульфата железа (III) не оказывает негативного влияния на прочность в возрасте 28 суток, но снижают прочность цементного камня в ранние сроки твердения (3 сут и 7 сут). Для образцов с добавкой полученные значения находились в диапазоне 17—24,8 МПа. Прочность

контрольного образца составила 25,4 МПа. Прочность на изгиб в возрасте 3 сут. и 7 сут. находилась в диапазоне 4,6—4,95 МПа, 5,6—5,88 МПа — для образцов с добавкой и 5,15—5,80 МПа — для контрольного образца. В возрасте 28 суток прочность на сжатие контрольного образца составила 35 МПа, в то время как для образцов с добавкой 36—45 МПа.

Проведенные исследования водопоглощения показали следующие результаты. Для контрольного образца водопоглощение, % по массе — 5,09 %, для состава с дозировкой добавки 0,3 мас. % — 4,3 %; 0,5 мас. % — 3,4 %; 0,8 мас. % — 3,5 %; 1 мас. % — 3,2 %; 1,5 мас. % — 3,69 %. Наименьшее значение водопоглощения находится у образцов с содержанием добавки 0,5 %, 0,8 % и 1 %. Для сравнения готовились модельные растворы, содержащие реактивные сульфаты железа (II) и (III) химически чистые. Для них показатель водопоглощения был 4,43 мас. %, 4,11 мас. % при дозировке 0,5 мас. %. При одинаковом содержании добавки, образцы с синтезированным раствором сульфата железа (III) показали более низкие значения водопоглощения, в сравнении с модельными растворами. По результатам испытаний были определены оптимальные составы с дозировкой добавки 0,5 % и 0,8 %.

Таким образом, раствор сульфата железа увеличивает устойчивость цементных растворов и бетонов к внешним воздействиям и может быть применен как колюматизирующий компонент.

1. Киушкин, Э. В. Разработка экологически безопасной технологии утилизации шлама химводоподготовки ТЭЦ : автореф. дис. канд. тех. наук : 25.00.36 / Э. В. Киушкин // Нижегород. гос. арх. строит. ун-т. — Н.Новгород, 2002. — 21 с.
2. Платонов, А. П. Дорожные строительные и лакокрасочные материалы: монография / А. П. Платонов [и др.]. — Витебск : УО «ВГТУ», 2012. — 100 с.
3. Киушкин, Э.В. Разработка экологически безопасной технологии утилизации шлама химводоподготовки ТЭЦ: автореф. дис. канд. тех. наук: 25.00.36 / Э.В. Киушкин // Нижегород. гос. арх. строит. ун-т. — Н. Новгород, 2002. — 21 с

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПА6, НАПОЛНЕННОГО САЖЕЙ ОБРАБОТАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОМ, НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Н.А. Марусенко¹, С.П. Богданович¹, А.А. Рогачев², Т.В. Жидко², Е.В. Шараев²

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», Гомель, Беларусь; Sennatar@mail.ru

²Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь; ichnm@ichnm.by

Введение. Весьма перспективным способом получения изделий без проектирования и изготовления литьевых форм представляется FDM-технология. В тоже время, развитие и расширение сфер применения указанной технологии невозможно без использования в качестве материалов для печати полимерных композитов, содержащих твердые модификаторы. Одними из наиболее перспективных наполнителей представляются аллотропные формы углерода, позволяющие регулировать не только механические, но и электрофизические свойства полимерной матрицы.

В исследовании [1] было показано, что предварительная ультразвуковая обработка технического углерода способствует разрушению агломератов частиц сажи и более равномерному их распределению в полимерной матрице, что выражается в дополнительном приросте показателей механических свойств композитов (модуля упругости — до 23 %, удлинения при разрыве до 3,2 раз, ударной вязкости до 1,3 раза) при сохранении текучести расплава на уровне литьевого композита. Комплекс указанных свойств позволил рекомендовать полученные материалы для использования при получении изделий по FDM-технологии.

Цель исследования — оценка влияния направления послойного наплавления композита на базе ПА6, модифицированного сажей, на его электрические и механические свойства.

Материалы и методы исследований. На основании результатов исследований [1] была выбрана рецептура полиамида 6 с добавлением 4 мас. % технического углерода марки С140 после ультразвуковой обработки. Для исследования изготавливали образцы в форме лопаток (тип 5) методом послойной печати с направлением наплавления нити 30, 45 и 90° к главной оси изделия. На рис. 1 представлена фотография типичной лопатки, полученной по FDM-технологии из разработанного композита.

По действующим стандартам определяли следующие показатели свойств: модуль упругости и предел текучести при растяжении, относительное удлинение при разрыве, удельные поверхностное и объемное электрические сопротивления.

Результаты и их обсуждение. Из композиционного материала выбранной рецептуры производили наработку прутка методом экструзии. Следует отметить, что исследуемый композит характеризовался хорошими

технологическими свойствами, а получаемый пруток высокой однородностью и гладкой глянцевой поверхностью. Печать осуществлялась на режимах аналогичных режимам печати ненаполненного ПА6 со степенью заполнения 100 %. Визуально, полученные тестовые образцы выглядели плотными и однородными, расслоений не наблюдалось, рис. 1.



Рис. 1. Фотография типичной лопатки, полученной методом FDM

были ниже, соответственно, в ≈ 2 и ≈ 40 раз, чем у лопаток, полученных литьем под давлением.

Интересно, что направление наплавления нити не оказывало существенного влияния на механические свойства образцов. Установлено, что FDM-технология получения образцов практически не влияет на их электрическое сопротивление.

Выводы. Наполнение высокодисперсным модификатором (сажей, предварительно обработанной в ультразвуке) до 4 мас. % позволяет получать композит, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к полимерам, применяемым в FDM-технологии. Электрическое сопротивление напечатанных образцов, а также их жесткость в области упругих деформаций незначительно отличаются от таковых в случае получения образцов методом литья под давлением. Технологичность полученного материала и уровень достигаемых показателей свойств позволяют считать, что степень наполнения может быть существенно повышена.

1. Марусенко Н.А., Богданович С.П., Ю. Се Влияние ультразвуковой обработки технического углерода на механические и электрофизические свойства полиамида 6 // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Междунар. Науч.-техн. конф., Гомель, 28–30 июня 2022 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В.Н. Адериха [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 92.

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИПИРРОЛА, СОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА ТИТАНА

Х.А. Новик¹, Ж.В. Игнатович¹, Л.Н. Филиппович^{1,2}, Т.В. Жидко¹, С.Н. Лемешонок¹

¹ ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси», Минск, Беларусь; novik.xristina@mail.ru

² ГНУ «Институт физико-органической химии НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Введение. Создание многофункциональных гибридных органо-неорганических материалов является актуальной задачей для многих областей применения, таких как опто- и фотоэлектроника, биотехнология и др. Свойства получаемого композита представляют собой не просто сумму свойств составляющих его компонентов, а изменяются и улучшаются за счет размерного эффекта, который особенно ощутим в случае нанокompозитов. Полимерные композиты, содержащие нанодисперсный TiO_2 , могут быть использованы для реализации фотохимических процессов при создании фоточувствительных материалов, сенсоров, мембран, проведения различных биохимических и биофизических процессов [1–3].

Цель работы — синтез композитов на основе полипиррола (Ппир), содержащих наночастицы диоксида титана (TiO_2), изучение их структуры и электропроводности в матрице из поливинилового спирта (ПВС).

Материалы и методы. Получение композита Полипиррол – TiO_2 . К 0,9 % водной эмульсии пиррола добавили 1,35 г щавелевой кислоты (ЩК, допант), перемешивали на магнитной мешалке до растворения кислоты. Затем прибавили 0,05 г HCl TiO_2 и 4,1 г персульфата аммония. Реакцию проводили 20 ч при комнатной температуре при перемешивании на магнитной мешалке. Осадок отделяли фильтрованием на фильтре Шотта с промывкой дистиллированной водой и 0,5 М водно-этанольным раствором щавелевой кислоты.

В случае полипиррола, допированного вместо щавелевой кислоты додецилбензолсульфокислотой (ДБСК, $V = 2,31$ мл) методика аналогична. Осадок отделяли центрифугированием и промывали дист. водой и 1 % водно-этанольным раствором ДБСК.

Определение структурных параметров композитов проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JCM-6000PLUS Neoscope с ЭДС детектором (JEOL, Япония). Запись УФ- спектров проводилась с использованием спектрофлуориметра SOLAR (CM2203) в диапазоне от 200 до 800 нм. Проводимость пленок определялась в ячейке в режиме циклической непрерывной раз- вертки в диапазоне ± 1 В на потенциогальваностате P45-X (г. Черноголовка). ИК-спектры записывали в диапазоне 4000—400 cm^{-1} на ИК-Фурье спектрометре Tensor-27 (Bruker, Германия) на просвет образцов, полученных путем их прессования в таблетку с KBr.

Пленки отливали по методике [4] из 9—10 %-ного раствора ПВС (150 кДа; Mowiol 28-99, Германия), содержащего (мас. %): глицерин (2,8—3,0), ДМФА (4,0—4,5), H_3BO_3 (0,05—0,10), композит полипиррол/наночастицы TiO_2 (7,5 мл), щавелевая кислота (2,5—4,0) и вода (до 100 %), который нагревали на водяной бане до температуры 85—90 °С для полного растворения ПВС в воде. Пленки сушили при комнатной температуре, толщина пленок составила 15—20 мкм.

Результаты и их обсуждение. Известно, что максимумы поглощения Ппир проявляются при 446 нм, 468 нм, 291 и 420 нм, 360 и 600 нм, 381 и 572 нм [5]. По данным УФ-спектроскопии (рис. 1) присутствует поглощение в случае Ппир в области 400—420 нм, обусловленное $\pi - \pi^*$ переходами, которое характеризует восстановленную форму Ппир. В спектре поглощения композита Ппир/ TiO_2 , допированного щавелевой кислотой появляются дополнительно интенсивные полосы в области 800—900 нм, вероятно, связанные с $\pi - \pi^*$ переходом в пиррольных кольцах и переходом электронов к поляронам и биполяронам окисленной формы Ппир.

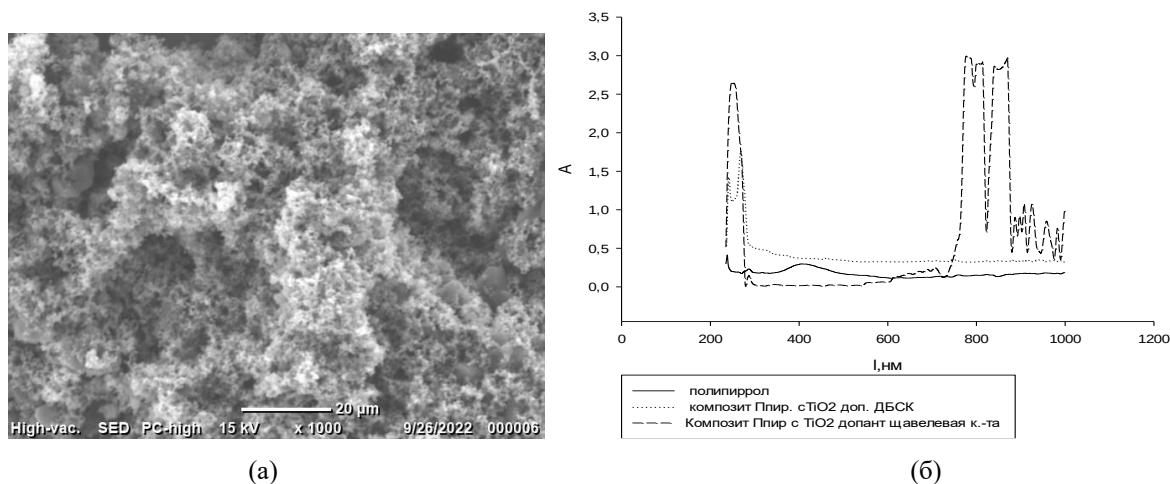


Рис. 1. СЭМ-изображение композита Ппир- TiO_2 , допированного щавелевой кислотой (а), УФ-вид спектр поглощения полипиррола и его композита с TiO_2 , допированного ДБСК и щавелевой кислотой (б)

Основные полосы колебаний окисленной электропроводящей формы полипиррола лежат в интервале 500—1800 cm^{-1} [6]. Их спектр содержит полосы колебаний пиррольного цикла 1540 cm^{-1} , а также связи C-N в кольце — 1450—1470 cm^{-1} , деформационные колебания связей C-H и C-N полипиррола — 1305 cm^{-1} и 1180 cm^{-1} , деформационные колебания N-H⁺ поляронной структуры — 1090 cm^{-1} , а также плоскостные колебания связей C-H и C-N — 1030—1040 cm^{-1} . В диапазоне выше 2000 cm^{-1} находится область водородных связей, структура которых хорошо развита в электропроводящем полимере, также происходит уширение и увеличение интенсивности полосы в области 3300 cm^{-1} для композита Ппир/ TiO_2 , допированного ДБСК, по сравнению со щавелевой кислотой, предположительно связанное с усилением Ван-дер-Ваальсова взаимодействия «композит-допант». Наличие полосы поляронной структуры 1090 cm^{-1} свидетельствует о том, что в составе композита полипиррол находится в окисленной электропроводящей форме (рис. 2).

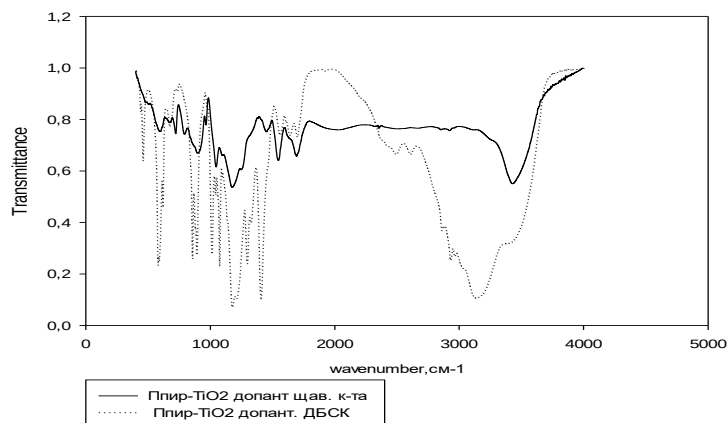


Рис. 2. ИК-спектры композита полипиррол- TiO_2 , допированного щавелевой и додецилбензолсульфоновой кислотами

В таблице представлены данные по электропроводности пленок из поливинилового спирта с композитом Ппир/ TiO_2 , дополнительной добавкой щавелевой и лимонной кислот, которые увеличивают электропроводность ПВС-пленки на 1 порядок по сравнению с пленкой с допантом ДБСК; в образце Ппир/ TiO_2 (допант ЩК) под воздействием УФ-облучения изменились электрофизические свойства композиционного материала, электропроводность увеличилась с $1,84 \cdot 10^{-5}$ до $2,33 \cdot 10^{-4}$.

Таблица. 1 Электропроводность ПВС-пленок

ПВС пленка	Электропроводность, См/м
Ппир/ TiO_2 (допант ЩК) с добавкой ЩК, 2,5—4,0 мас. %	$1,84 \cdot 10^{-5} \div 1,28 \cdot 10^{-5}$ после УФ облучения в течение 2 ч $2,33 \cdot 10^{-4}$
Ппир/ TiO_2 (допант ДБСК) с добавкой ЩК, 2,5—4,0 мас. %	$1,91 \cdot 10^{-6} \div 1,05 \cdot 10^{-6}$
Ппир/ TiO_2 (допант ЩК) с добавкой лимонной кислоты, 2,5—4,0 мас. %	$8,22 \cdot 10^{-5} \div 9,12 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, предложен метод синтеза композитов полипиррола с наночастицами диоксида титана по реакции окислительной полимеризации, получены ПВС-пленки, с электропроводностью от $1,05 \cdot 10^{-6}$ до $2,33 \cdot 10^{-4}$, которые могут быть использованы для создания фоточувствительных материалов и сенсоров.

1. Balcerski W., Ryu S. Y., Hoffmann M. R. Visible-light photoactivity of nitrogen-doped TiO_2 : photooxidation of HCO_2H to CO_2 and H_2O // J. Phys. Chem. C. – 2007. – V. 111. – P. 15357–15362.
2. Ohno T., Tsubota T., Toyofuku M., Inaba R. Photocatalytic activity of a TiO_2 photocatalyst doped with C^{4+} and S^{4+} ions having a rutile phase under visible light // Catalysis Letters. – 2004. – V. 98. – № 4. – P. 255–258.
3. Shibata H., Noda N., Ogura Y., Sogabe K., Sawa Y. Oxidation and reduction of nitrite ion in the TiO_2 photo-induced catalytic reaction // Bioscience, Biotechnology and Biochemistry. – 2000. – № 64 (8). – P. 1751–1753.
4. Л.Н. Филиппович, Ж.В. Игнатович, Х.А. Новик Композитные пленки на основе поливинилового спирта с добавками полианилина и наночастиц магнетита, золота и серебра // Сборник трудов 15 международной конференции «Пленки и покрытия – 2021». 2021 – С. 136–139.
5. А.В. Жмурова, Л.Е. Зеленков, А.И. Илларионов, Р. Ю. Шендрик и др. Оптическое поглощение композитных систем наночастиц серебра, распределенных в полимерных матрицах типа арабиногалактан и его привитой блок-сополимер с полипирролом // Известия РАН., серия физическая. – 2017, том 81, № 10. – С. 1382–1388.
6. И.Ю. Сапурина, В.В. Матреничев, Е.Н. Власова, М.А. Шитов, Е.М. Иванькова и др. Синтез и свойства электропроводящего материала на основе гибридных нановолокон алифатического сополиамида и полипиррола. // ВМС. Смеси полимеров, серия Б, 2020 – том 62, № 2. – С. 129–138.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ СПЛАВОВ CoNiP

М.И. Панасюк, Т.И. Усович, Т.И. Зубарь, А.Н. Котельникова,
О.Д. Канафьев, В.А. Федькин, А.В. Труханов

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь; maria.panasjuk.99@gmail.com

Цель работы — изучение корреляции между условиями синтеза (плотность тока, состав электролита, время осаждения), химическим составом, структурой и магнитными свойствами сплавов на основе Co и Ni .

Материалы и методы. Сплавы CoNiP электроосаждали на медные пластины с использованием двух различных электролитов, перечисленных в табл. 1. Подложки обезжиривали венской известью и травили в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8 + \text{H}_2\text{SO}_4$ 60 секунд. Температура электролитов 40°C .

Таблица 1. Условия синтеза

Электролит № 1			Электролит № 2			
Состав, г/л	Образец	Плотность тока	Состав, г/л	Образец	Плотность тока	Время
CoSO_4 – 150	CoNiP1.15	15 mA/cm^2	CoSO_4 – 150	CoNiP2.20	20	0,5 ч
NiSO_4 – 50	CoNiP1.20	20 mA/cm^2	NiSO_4 – 150	CoNiP2.30	30	
H_3BO_3 – 30	CoNiP1.30	30 mA/cm^2	H_3BO_3 – 30	CoNiP2.50	50	
NiCl_2 – 100			Na_2SO_4 – 60	CoNiP2.100	100	
NaH_2PO_2 – 10			NaH_2PO_2 – 8	CoNiP2.30.2	30	1 ч
Сахарин – 1			Сахарин – 1			

Магнитные свойства определяли с помощью автоматизированного вибрационного магнитометра “Liquid

Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic LTD", Лондон, Великобритания). Микроструктуру исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO 10 (SEM) (Zeiss, Оберкохен, Германия). Состав анализировали с помощью усовершенствованного энергодисперсионного рентгеновского спектрометра AZtec Life с Ultima Max 40 (Oxford Instruments, Богнор-Реджис, Великобритания).

Результаты и их обсуждение. Составы сплавов CoNiP, полученные при анализе энергодисперсионных рентгеновских спектров, показаны в табл. 2.

Таблица 2. Состав сплавов CoNiP

ат. %	Сплавы, полученные в эл-те № 1			Сплавы, полученные в эл-те № 2				
	CoNiP1.15	CoNiP1.20	CoNiP1.30	CoNiP2.20	CoNiP2.30	CoNiP2.50	CoNiP2.100	CoNiP2.30.2
Co	78	81	82	62	81	75	73	81
Ni	17	14	13	24	14	19	21	14
P	5	5	5	14	5	6	6	5

Электролит № 1. С увеличением плотности тока содержание кобальта увеличивается. Увеличение содержания кобальта в сплаве можно объяснить явлением «аномального» соосаждения. При аномальном соосаждении происходит преимущественное выделение на катоде кобальта, хотя его электродный потенциал более отрицательный, чем у никеля, то есть соотношение кобальта к никелю в сплаве значительно больше, чем в электролите.

Смешивание ионов никеля и кобальта порождает взаимодействие между ними, которое снижает скорость осаждения компонента сплава, имеющего более положительный стандартный потенциал. Добавление сульфата кобальта к раствору сульфата никеля значительно снижает парциальную плотность тока осаждения никеля.

Электролит № 2. Хорошо видна переходная плотность тока 20 мА/см², после которой наблюдается резкое увеличение содержания кобальта. При плотности тока 20 мА/см² у сплава наблюдается относительно низкое содержание кобальта и высокое содержание фосфора, граничащее со значением перехода кристаллический/аморфный 15 ат. %, наблюдаемым многими авторами в этой системе [1, 2]. Сплавы полученные при более высоких плотностях тока, содержат значительно меньшее количество фосфора.

Микроструктура полученных сплавов представлена на рис. 1.

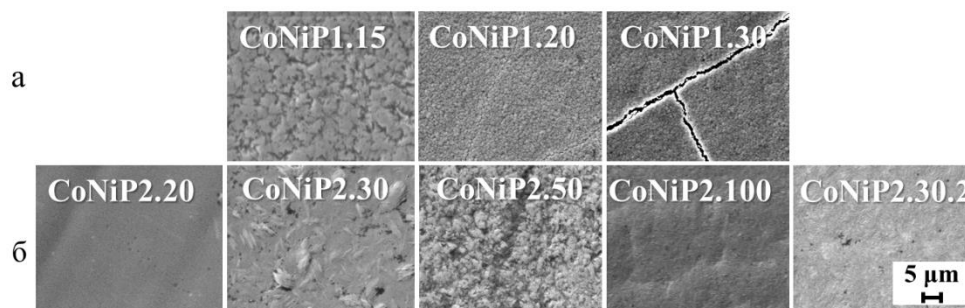


Рис. 1. Микроструктура сплавов CoNiP полученных в электролитах № 1 (а) и № 2 (б)

Более высокие плотности тока способствуют получению мелкокристаллических, компактных и равномерных покрытий, так как образование кристаллических зародышей протекает более интенсивно не только на выступах, но и на гранях кристаллов.

Кроме того, при повышении плотности тока происходит обеднение прикатодного пространства разряжающимися ионами, что, в свою очередь, приводит к увеличению поляризации, способствуя формированию мелкокристаллической, гладкой структуры. Однако с повышением плотности тока увеличиваются внутренние напряжения в осадке, что приводит к растрескиванию поверхности. Крайне важно отметить, что увеличение плотности тока в электролите № 2 не привело к растрескиванию поверхности осадков.

Магнитные свойства полученных сплавов приведены в табл. 3.

В электролите № 1 с увеличением плотности тока намагниченность насыщения монотонно уменьшается, что хорошо видно из табл. 3. Так же с увеличением плотности тока постепенно уменьшается остаточная намагниченность. Коэрцитивная сила напротив увеличивается с 284 Э до 465 Э с увеличением плотности тока от 15 мА/см² до 30 мА/см². Образец CoNiP2.30.2 обладает самой высокой коэрцитивной силой и остаточной намагниченностью. Самая высокая намагниченность насыщения у образца CoNiP2.20.

Таблица 3. Состав сплавов CoNiP

	Сплавы, полученные в эл-те № 1			Сплавы, полученные в эл-те № 2				
	CoNiP1.15	CoNiP1.20	CoNiP1.30	CoNiP2.20	CoNiP2.30	CoNiP2.50	CoNiP2.100	CoNiP2.30.2
M _r	8,075	5,989	6,69	1,3	11,1	3,6	6,5	34
M _s	287	194	161	239	178	103	209	216
H _c	284	422	465	50	890	420	688	1460

Примечание. Единицы измерения M_r, А·м²/кг; M_s, А·м²/кг; H_c, Э.

1. Fenineche N. Effect of pH and current density on the magnetic properties of electrodeposited Co-Ni-P alloys // Surf. Coat. Technol. – 1997 (88), 264–268.
2. Hüller K. The composition dependence of magnetization and curie temperature of Fe-P, Co-P and Ni-P // J. Magn. Magn. Mat. – 1985 (53), 103–110.

О НЕОБХОДИМОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ В БЕЛАРУСИ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ЛОМА

А.Н. Жигалов, А.Ю. Поляков, М.В. Башаримов

Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, Могилев, Беларусь;
mortis2008@mail.ru

В соответствии с патентом Кулиджа 1909 года первый удачный опыт использования порошка вольфрама для создания продукции широкого народного потребления был связан с процессом его прессования в брикеты, их нагревом и последующей уплотнительной кузнечной ковкой. Нагрев и ковка таких брикетов производились при температурах, меньших относительно температуры плавления вольфрама, и составляющих коммерческую тайну. На тот момент ввиду невозможности обработки карбида вольфрама протяжку спрессованных брикетов осуществляли через дорогостоящие алмазные фильеры, получая проволоку диаметром менее 0,02 мм с пределом прочности 413 МПа (нити накаливания). Добавление кобальта в исходный порошок карбида вольфрама (в количестве 3—13 %) позволило изготавливать фильеры, поддающиеся мехобработке и обладающие повышенной в несколько раз износостойкостью (параметры такого процесса также были засекречены).

Именно эта технология была применена военно-промышленным комплексом США в период 1915—1945 гг. для создания твердосплавного металлорежущего инструмента с повышением скорости резания чугунов и твердосплавных заготовок до 150 м/мин и более.

Сегодня твердосплавный инструмент на основе карбида вольфрама и кобальта используется всеми без исключений промышленными предприятиями, имеющими участки металлообработки. По данным аналитического агентства «Металлургический бюллетень» ежегодная мировая добыча вольфрама составляет не более 90000 тонн, причем ее подавляющая доля (81 %) приходится на пять стран — Китай (58 %), Канада (9 %), Россия (7 %), США (4 %), Вьетнам (3 %). По этой причине стоимость твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама составляет более 150000 долларов США за тонну.

Предприятия Республики Беларусь импортируют от 100 тонн твердосплавного инструмента ежегодно (более 2,2 млн. штук стоимостью более 20 млн. долларов США). Большую часть этого инструмента составляют многогранные твердосплавные пластины, полный эксплуатационный износ и списание в лом которых происходит за несколько десятков минут непрерывного резания. В процессах прерывистого резания деталей из чугунов износ происходит значительно быстрее. Таким образом, на предприятиях республики регулярно накапливается твердосплавный лом, в дальнейшем реализуемый по цене около 8000 долларов за тонну, то есть в 25 раз дешевле в сравнении с закупочной по импорту стоимостью инструмента.

До недавнего времени отсутствие научной базы, специального оборудования и технологий не позволяло организовать в стране малотоннажное производство твердосплавного инструмента из порошка, получаемого переработкой лома.

Институтом технологии металлов НАН Беларуси разработана технология по переработке твердосплавного лома в порошок на основе карбида вольфрама и кобальта методом цинкотермии. Сущность метода заключается в разрушении атомно-кристаллических связей между карбидом вольфрама и кобальтом за счет диффузии газообразного цинка в структуру при температурах нагрева твердого сплава и цинка свыше 580 °С и 800 °С, соответственно. Полученный порошок используется как исходное сырье для изготовления твердосплавного инструмента. Совершенствование структуры такого инструмента с целью повышения его ударной вязкости без снижения твердости будет обеспечено за счет аэродинамического резонансного воздействия акустическими волнами.

МАДЫФІКАЦЫЯ ПАВЕРХНІ СЛЮДЫ І АЛЮМІНІЮ З ВЫКАРЫСТАННЕМ СІЛАКСАНАВАЙ ХІМІІ

Б.В. Ранішэнка¹, І.А. Чалнакова², А.А. Позняк³, В.У. Шманай¹

¹ Інстытут фізіка-арганічнай хіміі НАН Беларусі, Мінск, Беларусь; ranishenka@gmail.com

² Інстытут радыябіялогіі НАН Беларусі, Гомель, Беларусь;

³ Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі, Мінск, Беларусь

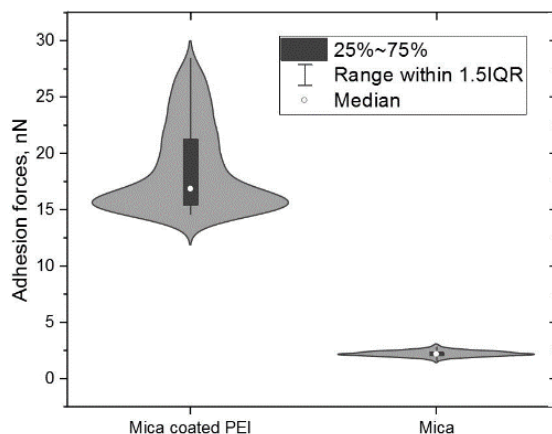
Уводзіны. Неарганічныя матэрыялы знаходзяць шырокае практычнае прымяненне ў якасці носьбітаў для вырашэння многіх сінтэтычных і аналітычных задач [1, 2]. У прыведзенай працы мы прымянілі апісаныя раней для мадыфікацыі шкла і крэмнію методыкі з з выкарыстаннем (3-хлорпрапіл)трыхлорсілану [3, 4] для мадыфікацыі пласцінак слюды і алюмінію азіднымі групамі. Мэтай працы была праверка працаздольнасці метадых на матэрыялах іншай прыроды і ацэнка іх эфектыўнасці (вызначэнне загрузкі па функцыянальных групах на адзінку паверхні). Дадаткова, мы выкарысталі апісаную намі метадыху [3, 4] мадыфікацыі шкла і крэмнію поліэтыленімінам на ўзорах слюды. Падложкі слюды, мадыфікаваныя поліэтыленімінам, паказалі здольнасць да імабілізацыі мікра- і нанапамераваў аб'ектаў, што было прыменена для аналізу экзасом і эрытрацытаў шляхам атамна-сілавой мікраскапіі (АСМ).

Вынікі і абмеркаванне. У якасці матэрыялаў для мадыфікацыі абраныя тонкія алюмініевыя пласціны (алюмініевая фольга) і слюда. Малая таўшчыня матэрыялаў дазваляе не ўлічваць паверхню бакавых граняў і палягчае ацэнку плошчы паверхні, якая, у сваю чаргу, звязана з масай матэрыялаў. Пласцінкі слюды і алюмінію разразалі на кавалачкі памерам прыкладна 2 мм×4 мм для правядзення іх аналізу ў фотаметрычнай кювеце.

Для функцыяналізацыі слюды і алюмінію азіднымі групамі выкарыстоўвалі раней апісаны пратакол функцыяналізацыі паверхні хлорпрапільнымі групамі [3, 4] з наступным нуклеафільным замяшчэннем хларыдных груп на азідныя. Для аналізу азідных груп на паверхні выкарыстоўвалі падыход, які заключаецца ў пераўтварэнні азідных груп у дыметоксітрытыльныя па рэакцыі азід-алкінавага цыкладалучэння [4]. У якасці рэферэнснага ўзору выкарыстоўвалі рэакцыю цыкладалучэння пры адсутнасці каталізатара. Аналіз праводзілі, змяшчаючы мадыфікаваны матэрыял у кварцавую мікракювету, якая ўтрымлівала 300 мкл 5 % раствора дыхлорвоцатнай кіслаты. Загрузка па функцыянальных групах складала $2,7 \pm 0,1$ азідных груп на квадратны нм для алюмініевай фольгі і $2,2 \pm 0,2$ нм⁻² для ўзораў слюды. Рэферэнсныя ўзоры паказалі сігнал, які знаходзіўся на мяжы чулівасці спектрафотметра.

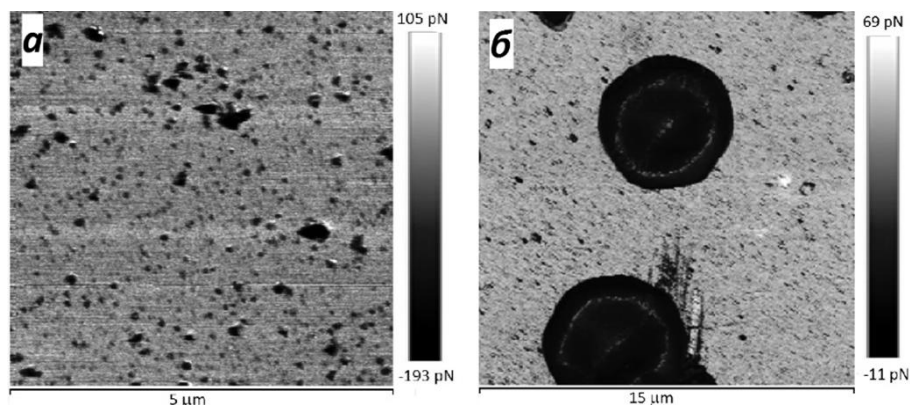
Узоры слюды таксама мадыфікавалі поліэтыленімінам па метадыху, апісанай для шкла і крэмнію [3, 4]. Гэтая мадыфікацыя ўяўляе цікавасць для выкарыстання ў АСМ, паколькі палімерны слой дазваляе імабілізаваць нанапамеравыя аб'екты з раствору.

Падложкі са слюды, мадыфікаванай поліэтыленімінам, мелі досыць гладкую паверхню з шурпатасцю $0,70 \pm 0,09$ нм. Велічыня шурпатасці перавышала паказчык шурпатасці звычайнай немадыфікаванай слюды, які ва ўмовах вымярэння складаў $0,14 \pm 0,02$ нм. Як паказана на малюнку 1, паверхня мадыфікаванай слюды мае значна большы адгезійны ўласцівасці, што спрыяе адсарбцыйнай імабілізацыі нана- і мікрааб'ектаў.



Мал. 1. Адгезійныя ўласцівасці звычайнай слюды і слюды, мадыфікаванай поліэтыленімінам

Падложкі паказалі здольнасць імабілізаваць біялагічныя аб'екты, такія як эрытрацыты і экзасомы. Замочванне падложак у адпаведных калаідных растворах на працягу менш за гадзіну дазволіла атрымаць гэтыя біяаб'екты ў адасобленай, прыдатнай для сканавання форме (малюнак 2).



Мал. 2. АСМ-сканы (карты адгезійных уласцівасцей) экзасом (а) і эрытрацытаў (б), імабілізаваных на поліэтыленімін-мадыфікаваных слюдяных падкладках

Як відаць на малюнку 2 (а, б), адгезія падложкі нашмат перавышае адгезію імабілізаваных аб'ектаў. Мы мяркуем, што падвышаная ліпкасць мадыфікаванай слюды стварае дадатковы кантраст на сканах адгезіі. Гэты эфект можа быць карысны для аналізу аб'ектаў малой таўшчыні, напрыклад, наначасцінак графену, таўшчыня якіх сувымерная з шурпатасцю мадыфікаванай слюды.

1. One-step, acid-mediated method for modification of glass surfaces with N-hydroxysuccinimide esters and its application to the construction of microarrays for studies of biomolecular interactions / S. Park [et al.] // *Bioconjug. Chem.* – 2010. – Vol. 21, No. 7. – P. 1246–1253.
2. Laurent, A. Parameters Controlling the One-Step Derivatization of Controlled Pore Glass with a Diol for Solid-Phase Synthesis of 3' Modified Oligonucleotides / A. Laurent, C. Chaix // *Org. Process Res. Dev.* – 2006. – Vol. 10, No. 3. – P. 403–408.
3. Modification of Ag SERS-active surface to promote charged analytes adsorption: effect of Cu^{2+} ions / B. V. Ranishenka [et al.] // *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2021. – Vol. 12. – P. 902–912.
4. Graphene oxide functionalization via epoxide ring opening in bioconjugation compatible conditions / B. Ranishenka [et al.] // *FlatChem.* – 2021. – Vol. 27. – P. 100235.

МИКРОСТРУКТУРА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ВОЛЬФРАМА ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ

А.А. Роткович¹, А.А. Бондарук¹, С.А. Герман^{1,2}, Т.И. Усович¹, Т.И. Зубарь¹,
А.В. Труханов¹, Е.С. Дашкевич¹, Д.И. Тишкевич¹

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь; rottkovich@gmail.com

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Введение. В современном мире прослеживается тенденция отказа от радиационных экранов на основе свинца, так как они обладают высокой токсичностью для человека и окружающей среды и имеют большие массогабаритные параметры [1]. Вместо них рассматриваются полимерные экраны, обладающие малым весом. Например, эпоксидная смола является прочным материалом с хорошей коррозионной стойкостью, что перспективно для использования в качестве матрицы для изготовления радиационных экранов [2]. Введение в матрицу экологически чистых наполнителей, в частности вольфрама, является актуальной задачей.

Цель работы — изготовление композитов на основе эпоксидной смолы и вольфрама, исследование микроструктуры композиционных материалов, расчет и анализ плотности экспериментальных образцов.

Материалы и методы. Композиционные материалы изготавливались из эпоксидной смолы ЭД-20 и порошка вольфрама ПВЧ. Массовое содержание вольфрама в экспериментальные образцы варьировалось от 10 до 80 %.

Технология синтеза заключалась в смешении двух компонентов на магнитной мешалке в течение 5 минут. В дальнейшем смесь поступала на водяную баню, нагретую до 50 °С, где гомогенизировалась 10 минут. После остывания образца композита к нему добавляли отвердитель ПЭПА, перемешивали и заливали в силиконовую форму с размерами ячейки 4,8×4,8 см². Отверждение происходило в течение 24 часов.

Исследование химического состава полученных композитов проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием Carl Zeiss EVO10 и приставки Oxford. Эффективную плотность образцов рассчитывали по методу Архимеда [3].

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлено СЭМ-фото поверхности порошка вольфрама (рис. 1, *a*) и график распределения размера зерен вольфрама (рис. 1, *b*).

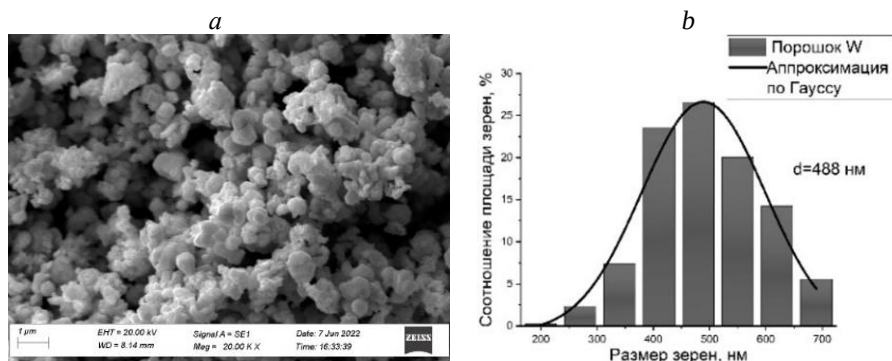


Рис. 1. СЭМ-снимок поверхности изначального порошка вольфрама (*a*) и график распределения размера зерен вольфрама (*b*)

Все образцы перед СЭМ-исследованиями были отполированы с использованием шлифовально-полировального станка FORCIPOL 202. По СЭМ-анализу видно, что вольфрам имеет зерна около квадратной формы с четкими углами (рис. 1, *a*). Установлено, что зерна вольфрама размером менее 480 нм занимают около 26 % всей площади, при этом наиболее вероятный диаметр зерен равен 488 нм (рис. 1, *b*).

Результаты измерения плотности показали, что при увеличении содержания наполнителя от 10 до 80 % эффективная плотность изменяется от 1,25 до 4,36 г/см³. Относительная плотность колеблется в пределах от 91,15 до 98,13 %.

На рис. 2 приведены СЭМ-фото поверхности образца (рис. 2, *a*) и СЭМ-фото поверхности поперечного сечения образца (рис. 2, *b*) с содержанием вольфрама 80 %, эпоксидной смолы 20 % (W80-Э20).

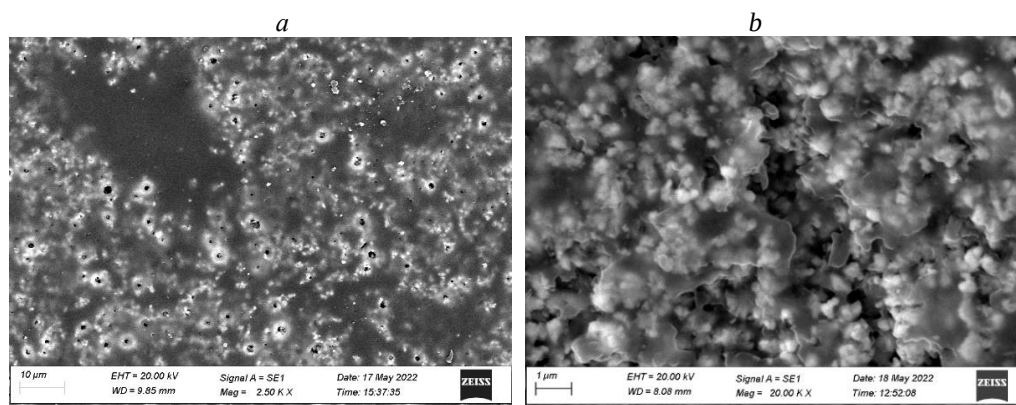


Рис. 2. СЭМ-фото поверхности образца (рис. 2, *a*) и СЭМ-фото поверхности поперечного сечения образца (рис. 2, *b*) с содержанием вольфрама 80 % (W80-Э20)

На рис. 2, *a* наблюдается большое количество пор на поверхности композита, что можно объяснить наличием пузырьков воздуха в образце перед процессом отверждения. На фотографии поперечного сечения (рис. 2, *b*) заметны зерна вольфрама, окруженные эпоксидной матрицей. При высоком содержании наполнителя он равномерно распределился в системе, но видны агломерированные участки.

Выводы. Получены композиты системы эпоксидная смола/вольфрам и изучена их микроструктура. В ходе исследования проведен статистический анализ размера зерен вольфрама и расчет наиболее вероятного диаметра зерен. Эффективная плотность изменялась от 1,25 до 4,36 г/см³, а относительная — от 91,15 до 98,13 %. Выявлена зависимость эффективной плотности от содержания наполнителя. Рассмотрены СЭМ-снимки исходного порошка вольфрама и поверхности поперечного сечения образца W80-Э20. В будущем планируется проводить исследования эффективности экранирования от ионизирующего излучения [4]. Таким образом, композиционная система эпоксидная смола/вольфрам является перспективным материалом для изготовления радиационных экранов.

1. Low cost radiation shielding material for low energy radiation applications: Epoxy/Yahyali Stone composites / N. Sahin [et al.] // Prog. Nucl. Energy – 2021. – Vol. 135. – P. 103703
2. Gamma Ray Shielding Property of Tungsten Powder Modified Continuous Basalt Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composites / H. Yingwei [et al.] // Polym. Compos. – 2017. – Vol. 39. – P. 2106–2115

3. Композиты полимерные. Метод определения пустот: ГОСТ Р 56679–2015. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
4. Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding / L. Chang [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2015. – Vol. 356–357. – P. 88–93

СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ, НАПОЛНЕННЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫМИ ГРАФЕНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

В.О. Савицкий¹, В.В. Рубаник¹, В.В. Рубаник мл.¹, В.Г. Дородейко¹,
Phuong Doan Thang², Bui Hung Thang²

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

²Institute materials science VAST, Ha Noi, Vietnam

Способ изготовления наполненных каучуков оказывает существенное влияние на их химический состав, распределение наполнителя, то есть степень его диспергирования, прочность взаимодействия с полимером, пластические и эластические свойства каучуков, технологические свойства смесей и технические свойства резин. В связи с этим, наполнение каучуков на стадии латекса является актуальным и развивающимся направлением. Жидкофазным методом можно получить композиции с практическим любым наполнителем, равномерно распределённым по полимерной фазе, при этом степень наполнения может изменяться в широких пределах [1].

Графен, полученный методом жидкофазного расслоения графита с помощью ультразвука, сформирован из тонких наночешуек, обладающих большой площадью поверхности и удовлетворяющих требованиям высокого соотношения линейных размеров к частицам полимера, предъявляемого к усиливающим частицам для приготовления высокопрочных композиционных полимерных материалов. Таким образом, это уникальное сочетание химических и механических характеристик делает графитовые нанослои перспективным наполнителем для синтеза высокопрочных полимерных нанокомпозитов, и, в частности, нанокомпозитов на основе каучука.

Для получения полимеров использовали каучук натуральный вальцованный SVR-3L (Вьетнам), в качестве добавок — диоксид кремния 20 мас. % и графеновые углеродные частицы, полученные с помощью ультразвукового расслоения графита [2] (0 мас. %, 1 мас. %, 10 мас. % и 20 мас. % от массы полимера). Введение и диспергирование графеновых добавок и SiO₂ в раствор полимеров проводили с помощью диспергатора УЗДН-2М мощностью 0,4 кВт и частотой 22 кГц. Процесс получения нанополимера на основе каучука состоит из 4 стадий: приготовление 4 %-го пленкообразующего полимера (4 % каучук и 96 % ксилол); введение в 4 % раствор пленкообразующего полимера 20 мас. % SiO₂ к массе каучука и ультразвуковая обработка (УЗО) до полного растворения ($\approx$ 5 минут); введение заданных концентраций графеносодержащего материала в опытные образцы каучука, содержащие 20 мас. % диоксида кремния, УЗО до полного растворения ($\approx$ 7 минут); заливка на подложки, затвердевание.

DSC-кривые каучуковых полимеров, модифицированных графеном, получали на дифференциальном сканирующем калориметре Mettler Toledo DSC822e с рабочим диапазоном от -70 °C до 700 °C. Скорость нагрева составляла 10 °C/мин. В полимере в интервале температур от 200 до 300 °C наблюдается разложение пластификатора. Затем идет разложение эластомера в интервале от 340 до 385 °C и от 440 до 480 °C (рис. 1). Добавление графеновых структур привело к изменению цвета получаемых полимеров.

При увеличении концентрации графеновых добавок наблюдается рост прочности и уменьшение относительного удлинения. Так при добавлении 1 мас. % графеновых структур предел прочности увеличился с $1,9$ МПа для полимера без графеновых добавок до 2 МПа, прт этом относительное удлинение не изменилось. Добавление 10 мас. % графеносодержащей добавки привело к резкому росту предела прочности до $2,7$ МПа и уменьшению относительного удлинения при разрыве с 810 до 480 %. Предел прочности полимера с добавлением 20 мас. % графеносодержащей добавки составил $3,6$ МПа, а относительное удлинение практически не изменилось и составило 510 % (рис. 2, а). Остаточное удлинение образцов в пределах погрешности не изменилось и составило 200 % (рис. 2, б).

Таким образом, добавление графеновых частиц в каучуковый полимер приводит к росту их прочностных характеристик. Предел прочности полимеров на основе каучка, наполненных 20 мас. % графеновых структур, составляет $3,6$ МПа, что в два раза больше, чем без добавления. Температурный интервал разложения пластификатора у модифицированных образцов полимеров не изменился и составил от 200 до 300 °C.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект № T19B-009).

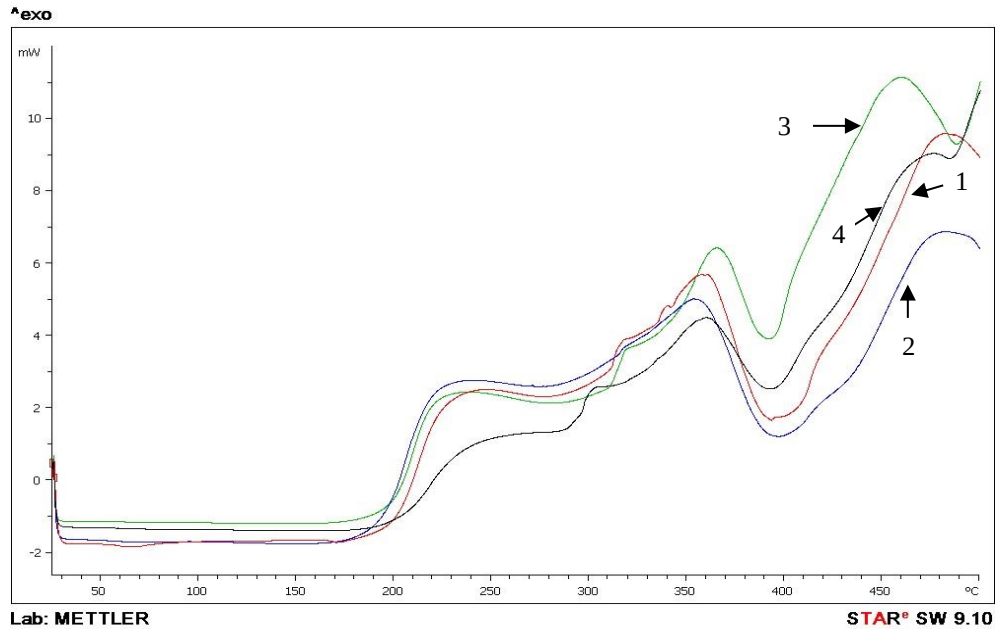


Рис. 1. DSC-кривые полимеров на основе каучука с содержанием графеновых добавок: 1 — 0 мас. %, 2 — 1 мас. %, 3 — 10 мас. %, 4 — 20 мас. %

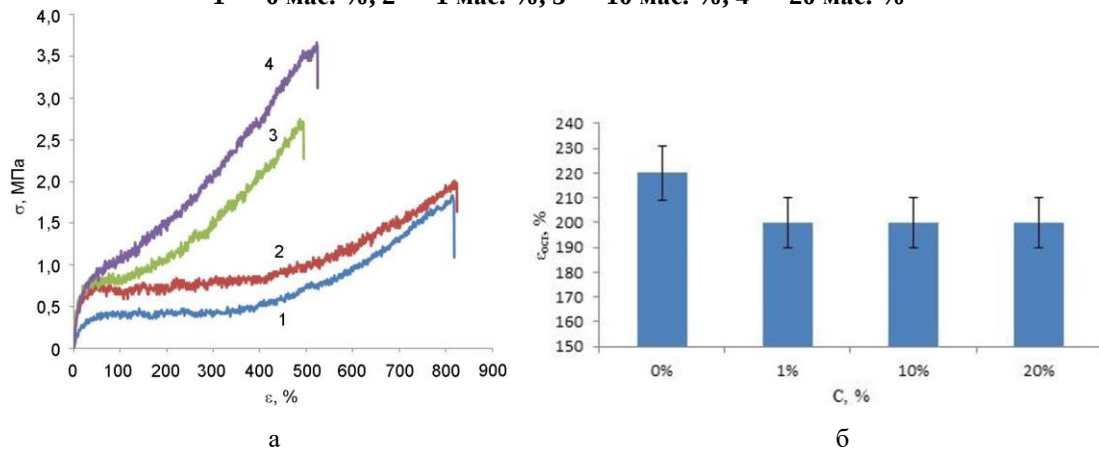


Рис. 2. Зависимость предела прочности от относительного удлинения (а) и остаточное удлинение (б) нанополимеров из натурального каучука с концентрацией графеновых включений: 1 — 0 мас. %; 2 — 1 мас. %; 3 — 10 мас. %; 4 — 20 мас. %

1. Модификация синтетических каучуков с целью улучшения упруго-прочностных свойств эластомерных композиций / Долинская Р.М., Прокопчук Н.Р., Коровина Ю.В. // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2015. – с. 29 – 36.
2. Использование ультразвуковых колебаний при получении графеновых структур в растворителе / В.В. Рубаник, В.О. Савицкий, В.В. Рубаник мл. [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции, 25–29 мая 2020 г., г. Витебск, Беларусь / под ред. В.В. Рубаника. – Молодечно: Типография «Победа», 2020. – с. 381–382.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ПРИСУТСТВИИ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ И ФТОРОРГАНИЧЕСКИХ МОНОМЕРОВ НА ПОКАЗАТЕЛЬ КАПИЛЛЯРНОСТИ УГЛЕРОДНОЙ ЛЕНТЫ

В.А. Стратанович

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

Введение. Одной наиболее актуальных проблем создания волокнистых материалов, является обеспечение хорошей смачиваемости, для чего используются различные методы, в т.ч. и низкотемпературная плазма

[1—3]. Обеспечение смачиваемости имеет особую важность в процессах окрашивания, препрегирования, а также создания дисперсно наполненных композиционных материалов [1]. В ряде источников [4—6] показатель капиллярности предлагается основным критерием оценки смачивающей способности волокон.

Цель работы — исследование влияния плазмохимической обработки в присутствии остаточных газов и фторорганических мономеров на показатель капиллярности углеродной ленты.

Материалы и методы исследований. Экспериментальным материалом являлась однонаправленная углеродная лента (УЛ) ЛО-1-12Н/160 производства ОАО «СветлогорскХимволокно» (Беларусь).

Плазмохимическую обработку (ПХО) проводили на опытно промышленной установке [7], оснащенной генератором плазмы с частотой $f_{\text{гп}} = 32$ кГц. Обработка проводилась в среде остаточных газов (гидрофилизирующая обработка, ОГ) и в среде фторорганического мономера октафторциклобутана (ОФЦБ, C_4F_8) (гидрофобизирующая обработка). Приняты следующие технологические режимы: давление остаточных газов $P_{\text{ост}}$ 2—4 Па, давление мономера $P_{\text{м}}$ 10—15 Па, время обработки $t_{\text{обр}}$ 90 с., напряжение на генераторе $U_{\text{ген}}$ 120 В. При обработке в среде остаточных газов режимы аналогичны, за исключением $P_{\text{ост}}$, которое принималось в диапазоне 10—15 Па.

Линейную и поверхностную плотность после ПХО оценивали по ГОСТ 29104.1–91 путем измерения массы ткани и ее геометрических параметров.

Капиллярность оценивали с помощью весов GX-1000 подвешивая исследуемый образец УЛ, на штативе весов. На подставку весов устанавливали резервуар, который заполняли дистиллированной водой, перед наполнением резервуара значение весов обнуляли. Далее наполняли резервуар водой таким образом, чтобы образец УЛ был погружен в нее на глубину 15 мм. В указанных условиях капиллярность K оценивали по приращению массы непрерывно взвешиваемого образца Δm с течением времени t . Частота регистрации данных принималась равной 1 с, время эксперимента составляло 30 мин.

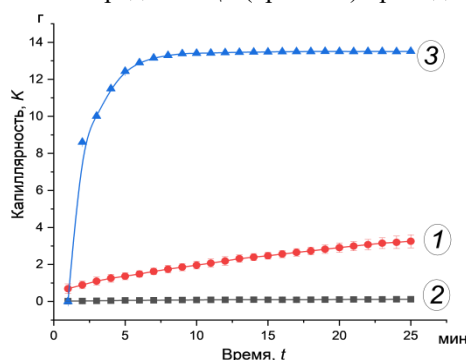
Результаты и их обсуждение. Результаты измерения линейной и поверхностной плотности, а также кривые капиллярного набора со временем отражены ниже.

Таблица 1. Результаты измерения линейной и поверхностной плотности УЛ

Наименование параметра	Паспортные показатели	Без ПХО (контроль) ①	Обработка в ОФЦБ ②	Обработка в ОГ ③
M_L , г/м	$55,0 \pm 5,0$	53,2	54,5	54,0
M_S , г/м ²	—	334,5	335,3	330,9

Анализируя экспериментальные полученные данные (табл. 1) и зависимости $K = \Delta m = f(t)$ для УЛ, обработанной в ОГ и ФО (рис. 1) можно сделать следующие выводы:

- 1) ПХО не приводит к существенному изменению линейной и поверхностной плотности УЛ.
- 2) Обработка в ОГ (кривая 3) приводит к увеличению смачиваемости поверхности УЛ водой в сравнении с УЛ без ПХО (кривая 1), обработка же в среде ОФЦБ (кривая 2) приводит уменьшению данного параметра.



① — Без ПХО, ② — Обработка в ОФЦБ, ③ — Обработка в ОГ

Рис. 1. Кривая, отражающая капиллярный набор массы жидкости углеродной лентой с течением времени

Выводы. Таким образом, ПХО в среде ОГ и ОФЦБ не приводит к значительному изменению линейной и поверхностной плотности УЛ, и при этом позволяет регулировать показатель смачиваемости УЛ.

Благодарности. Автор выражает благодарность к.т.н. Иванову Л.Ф., к.т.н. Граковичу П.Н., д.т.н., доценту Толстопятову Е.М. и ст. н.с. Макаренко В.М. за помощь в проведении исследований и обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии 4.2.2.».

1. Шелестова, В.А. Конструкционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена и модифицированных углеродных волокон // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Гомель. — 2002.
2. Гут, М.М. Химические особенности формирования фторполимерного покрытия на поверхности углеродных волокон в плазме октафторциклобутана // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2017). — 2017. — С. 180–180.
3. Гракович, П.Н. Эффективный антифрикционный материал «Суперфлувис» для использования в компрессоростроении // Технические газы. — 2006. — №. 3. — С. 68–72.
4. Skundric, P. et al. Wetting properties of hemp fibres modified by plasma treatment // Journal of Natural Fibers. — 2007. — Т. 4. — №. 1. — С. 25–33.
5. Zille A., Oliveira F.R., Souto A.P. Plasma treatment in textile industry // Plasma processes and Polymers. — 2015. — Т. 12. — №. 2. — С. 98–131.
6. Skundric P. et al. Wetting properties of hemp fibres modified by plasma treatment // Journal of Natural Fibers. — 2007. — Т. 4. — №. 1. — С. 25–33. Zhu, J., Chen, S., Wang, B., & Zhang, X. The research progress of hexafluorobutadiene synthesis // International Journal of Organic Chemistry. — 2014. — Т. 4. — №. 05. — С. 331.
7. Гарифуллин, А.Р. Регулирование комплекса свойств технического текстиля из углеродных волокон для производства композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. - Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017 // Казань. — 2017. — Т. 40. — №. 47. — С. 48.
8. Гракович, П.Н., Толстопятов Е.М., Иванов Л.Ф., Шелестова В.А., Макаренко В.М., Стратанович В.А. Установка для плазмохимической обработки углеродных тканей. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии // XVI Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ (13–17 сентября 2021 г., Иваново, Россия): сборник трудов / Иван. Гос. Хим.-технол. Ун-т. — Иваново, 2021. — 101 с.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА И 1,3-ГЕКСАФТОРБУТАДИЕНА В ИДЕНТИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

В.А. Стратанович

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

Введение. В настоящее время промышленность идет по пути интенсификации технологических процессов. Для достижения конкурентного преимущества в современных условиях используют более производительные, энергоэффективные, экологически чистые, безотходные методы обработки и функционализации материалов. В прикладной плазмохимической технологии одним из таких примеров может являться поиск новых мономеров, используемых для увеличения производительности процессов травления и формирования покрытий [1–4].

Цель работы — проведение сравнительной оценки скорости формирования покрытий при плазменной полимеризации октафторциклобутана и 1,3-гексафторбутадиена [4] в идентичных условиях

Материалы и методы исследований. В рамках работы выбраны газообразные фторорганические мономеры октафторциклобутан C_4F_8 (ОФЦБ), и 1,3-гексафторбутадием C_4F_6 (ГФБ).

Плазмохимическую обработку проводили на опытно промышленной установке [5], оснащенной генератором плазмы с частотой $f_{гн} = 32$ кГц. Приняты следующие технологические режимы: давление остаточных газов $P_{ост}$ 2–4 Па, давление мономера P_m 10–15 Па, время обработки $t_{обр}$ 90 с, напряжение на генераторе $U_{ген}$ 120 В. В рамках эксперимента фиксировалось изменение частоты колебаний кварцевых измерителей толщины с исходной частотой колебания $f_0 = 4$ МГц. Для исключения влияния температуры в области горения плазмы на показания частоты датчика измерение последней проводили через 10 мин после выключения генератора.

Пользуясь известным [6–8] уравнением, определяли толщину сформированного покрытия (формула 1) и определяли ее зависимость от расхода мономера V_m .

$$d_n = f(V_m); d_n = \frac{\Delta f \cdot N \cdot \rho_q \cdot A_d^2 \cdot \rho_n}{f_0^2} \cdot 10^7, \text{ нм} \quad (1)$$

где Δf — изменение частоты после формирования покрытия, Гц; N — постоянная. N принимается равной 1,67 Гц·мм; ρ — плотность кварца, ρ принимается равной 2,65 г/мм³; A_d — площадь поверхности кварцевого датчика, мм², $A_d = 0,2$ см²; ρ_n — плотность сформированного покрытия, ρ принимается равной 2,0 г/мм³;

Результаты и их обсуждение. Анализируя экспериментальные полученные зависимости $d_n = f(V_m)$ для ОФЦБ и ГФБ (рис. 1) можно сделать следующие выводы:

1) Зависимость получаемых толщин покрытий при полимеризации ОФЦБ имеет вид, близкий к линейному, с увеличением расхода газа, не наблюдается роста покрытия;

2) Зависимость получаемых толщин покрытий при полимеризации ГФБ описывается кривой Лоренца

или Гаусса, с явным экстремумом.

3) Скорость роста покрытий при полимеризации ГФБ при расходе 125—225 отн.ед. заметно (в 2,5—2,8 раза) выше в сравнении с ОФЦБ.

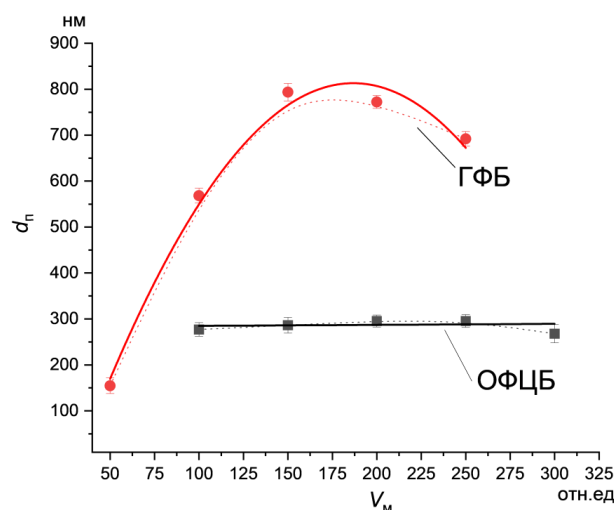


Рис. 1. Зависимость толщин получаемых покрытий d_n от расхода мономера V_m при полимеризации ОФЦБ и ГФБ

Выводы. Таким образом, можно рекомендовать 1,3-гексафторбутadiен для формирования покрытий в плазме. При этом наибольшая скорость формирования покрытий достигается при расходе 125—225 отн.ед.

Благодарности. Автор выражает благодарность к.т.н Иванову Л.Ф., к.т.н Граковичу П.Н., д.т.н., доценту Толстопятову Е.М. и ст. н.с. Макаренко В.М. за помощь в проведении исследований и обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии 4.2.2.».

1. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. М.: Мир, 1988, 376 с.
2. Chatterjee R. Evaluation of unsaturated fluorocarbons for dielectric etch applications. – 2004.
3. Li, X., Hua, X., Ling, L., Oehrlein, G. S., Barela, M., & Anderson, H. M. Fluorocarbon-based plasma etching of SiO₂: comparison of C 4 F 6/Ar and C 4 F 8/Ar discharges // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2002. – Т. 20. – №. 6. – С. 2052–2061.
4. Zhu, J., Chen, S., Wang, B., & Zhang, X. The research progress of hexafluorobutadiene synthesis // International Journal of Organic Chemistry. – 2014. – Т. 4. – №. 05. – С. 331.
5. Гракович, П. Н., Толстопятов Е. М., Иванов Л. Ф., Шелестова В. А., Макаренко В. М., Стратанович В. А. Установка для плазмохимической обработки углеродных тканей. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии // XVI Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ (13–17 сентября 2021 г., Иваново, Россия): сборник трудов / Иван. Гос. Хим.-технол. Ун-т. – Иваново, 2021. – 101 с.
6. Майселл Л., Гленг Р. Технология тонких пленок: справочник, Т. 2 (Сов. Радио // Москва. – 1977.
7. Sauerbrey G. The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing // Z. Phys. – 1959. – Т. 155. – С. 206–222.
8. Zhang Y., Chen D. Multilayer integrated film bulk acoustic resonators. – Springer Science & Business Media, 2012.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПОЛИУРЕТАНОВ

А.А. Тимофеев

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
tymoshenko13@gmail.com

Введение. Вторичная переработка отходов полиуретанов (ПУ) представляется актуальной задачей, т. к. позволяет не только существенно сократить загрязнение окружающей среды, но и увеличить коэффициент использования дорогостоящих и не производимых в Беларуси сырьевых ресурсов. Однако полиуретаны в процессе первичной переработки и эксплуатации претерпевают значительные физико-химические изменения, и их компенсация является важной задачей, которую можно решить на базе создания новых рецептурно-технологических решений путем введения в композицию модифицирующих дисперсных наполнителей.

Цель работы — исследование влияния дисперсных наполнителей на физико-механические характеристики полимерных композиций на основе отходов полиуретанов.

Материалы и методы исследования. В качестве основного компонента композитов использовали вторичное полимерное сырье в виде отходов ПУ обувных предприятий — смесь пенополиуретана и термопластичного ПУ (вт. ПУ). С целью повышения технологичности переработки композиций применяли следующие ингредиенты: масло вазелиновое (ГОСТ 3164) и стеарат цинка (ТУ 2432-011-10269039-2013) в количестве 0,25—1,0 мас. %. В качестве наполнителей использовали: аэросил А-380 (ГОСТ 14922), отходы коврового производства (кноп стригальный полипропиленовый с длиной волокон 2—4 мм), отходы деревообработки (древесная мука (ДМ), с размером частиц 8—78 мкм) в количестве 0,1—5,0 мас. %.

Композиционные материалы исследовали по следующим показателям: плотность (ГОСТ 267), твердость по Шору А (ГОСТ 263), абразивный износ на машине «APG-300» (ГОСТ 11012). Разрушающее напряжение при растяжении, относительное удлинение и модуль упругости определяли по ГОСТ 11262 на исследовательском комплексе «Instron 5657» («Instron», Великобритания).

Результаты и их обсуждение. Предварительно проведенные исследования показали, что введение во вт. ПУ целевых технологических добавок в виде вазелинового масла и стеарата цинка способствует улучшению его перерабатываемости. На основе базовой композиции «вт. ПУ + технологическая добавка» были получены композиты с различным содержанием дисперсных наполнителей, исследованы показатели их физико-механических свойств. Зависимости свойств композитов от рецептурного состава представлены на рис. 1 и рис. 2.

Введение ультрадисперсных частиц аэросила в базовую композицию «вт. ПУ + масло вазелиновое + стеарат цинка» (рис. 1, а, рис. 2, а) позволяет повысить прочностные характеристики на 18—27 %, твердость — на 5—8 %, а также снизить абразивный износ образца в 2 раза по сравнению с исходным вт. ПУ. В то же время наблюдается снижение величины относительного удлинения при разрыве на 17—30 %. Оптимальное содержание аэросила в композиции находится в пределах 0,2—0,5 мас. %. Улучшение физико-механических свойств композиции во многом определяется равномерным распределением частиц аэросила в объеме материала. Его увеличение более 0,5 мас. % приводит к снижению показателя прочности и твердости материала.

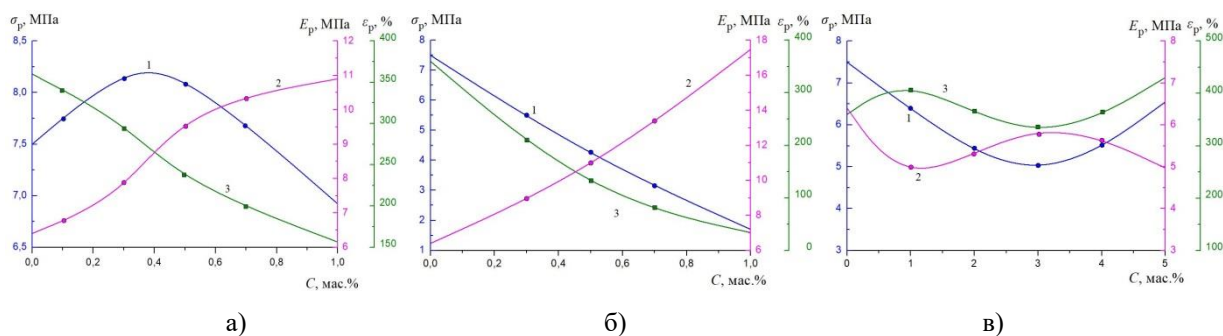


Рис. 1. Зависимость физико-механических характеристик вт. ПУ от содержания аэросила (а), кнопа (б), древесной муки (в) в композите: 1 — предел прочности при растяжении (σ_p); 2 — модуль упругости при растяжении (E_p); 3 — относительное удлинение при разрыве (ϵ_p)

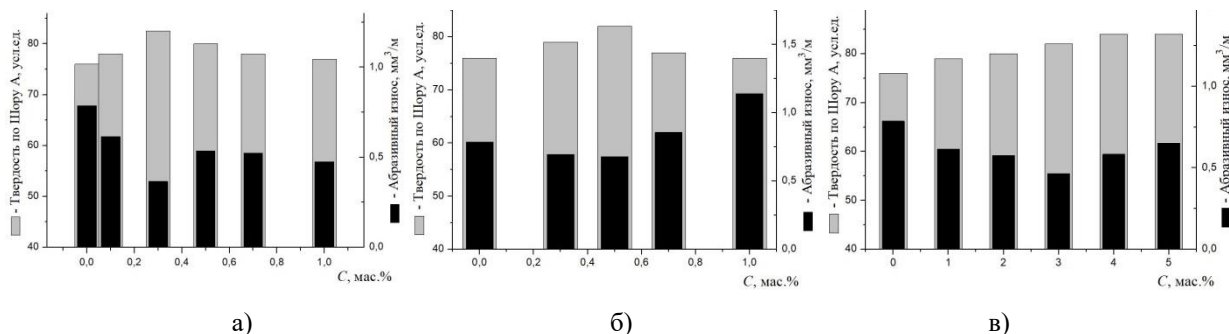


Рис. 2. Зависимость физико-механических характеристик вт. ПУ от содержания аэросила (а), кнопа (б), древесной муки (в) в композите: твердость по Шору А, абразивный износ (V_i)

Установлено, что при введении в композицию добавки «кноп стригальный» (рис. 1, б, рис. 2, б) характерно отсутствие стабильности физико-механических характеристик, в особенности, при содержании кнопа в пределах 0,5—1,0 мас. %. Это связано, по-видимому, с низкой совместимостью данного типа полимерного волокна с расплавом вт. ПУ, что обуславливает неоднородность структуры композиции.

ДМ можно рассматривать как недорогой наполнитель, который может помочь снизить содержание в

композиции полимерного связующего, а при определенной концентрации повысить жесткость и износостойкость изделий. Установлено (рис. 1, в, рис. 2, в), что введение ДМ во вт. ПУ в концентрациях 1 мас. % и 5 мас. % позволяет сохранить прочностные свойства композиции на уровне исходного вт. ПУ. Волокнистая структура частиц древесины в некоторых оптимальных концентрациях этого наполнителя позволяет реализовать возможность формирования упорядоченной структуры композиционного материала. Необходимым условием для обеспечения данного эффекта является достижение в процессе переработки оптимальной технологической совместимости древесных частиц с полимерной матрицей.

Заключение. Таким образом, использование комбинации целевых модифицирующих добавок с индивидуальным эффектом, реализуемым каждой из них, позволяет для отечественных обувных производств сохранить и улучшить уровень качества готовых изделий на основе вт. ПУ, обеспечить рециклинг отходов ПУ, снизить себестоимость конечной продукции, улучшить экологическую составляющую и расширить ассортимент полимерных композиционных материалов.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛИФАТИЧЕСКОГО ПОЛИКЕТОНА

В.Н. Усова, Ю.М. Кривогуз, В.Н. Коваль

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
viktoriya.usovav@mail.ru

Алифатические поликетоны (АПК) относятся к группе новых экологически чистых и перспективных конструкционных пластиков. Одним из способов получения АПК является сополимеризация монооксида углерода с различными олефинами [1]. Доступность и низкая стоимость монооксида углерода являются важными факторами при получении сополимеров на его основе. Высокий интерес среди исследователей и практиков к АПК объясняется уникальным сочетанием их свойств, характеризующихся высокими показателями химической стойкости, износостойкости, механической прочности и низкой проницаемости. Наряду с этим был обнаружен ряд существенных недостатков, среди которых следует выделить относительно низкие ударную вязкость, морозостойкость и эластичность, что серьезно ограничивает возможности использования их в различных областях техники. По этой причине в настоящее время интенсивно развиваются различные методы модифицирования свойств АПК. В данной работе приводятся результаты изучения особенностей модифицирования структуры и свойств АПК добавками различных типов термоэластопластов.

Объектами исследования служили АПК (марка M710F), стирольный (марка Masflex 55111NAT7110) и полиэфирный (марка Triel H5550) термоэластопласты, а также эпоксицированное соевое масло (ЭСМ). Смесевые композиции получали при использовании двухшнекового экструдера с односторонним вращением шнеков ($D = 35$ мм, $L/D = 40$) при температуре расплава 230°C и частоте вращения шнеков 300 об/мин. Об изменениях структуры и свойств полученных материалов судили по данным ДСК, релаксационной спектроскопии, а также по результатам механических и реологических испытаний.

Произведенная оценка действия стирольного и полиэфирного термоэластопластов на структуру и свойства смесевых композиций на основе АПК позволила установить:

- особенности изменения температур фазовых переходов АПК фазы в смесевых композициях;
- характер релаксационных процессов в смесевых композициях на базе АПК и термоэластопластов;
- температурные зависимости динамического модуля сдвига исследуемых смесевых композиций;
- закономерности, обусловленные влиянием типа термоэластопласта на структуру, а также механические и реологические свойства материалов;
- эффекты повышения до 2-х раз ударной вязкости смесевых материалов на базе АПК при модифицировании их добавками полиэфирного термоэластопласта;
- возможность получения материалов на базе смесей АПК с термоэластопластами стойкими к воздействию серной кислоты и с различными значениями твердости по Шору D.

Комплексный анализ динамических, механических и реологических свойств исследуемых смесевых композиций показал, что модифицирование АПК стирольными и полиэфирными термоэластопластами может использоваться для создания полимер-полимерных композиционных материалов с расширенным диапазоном эксплуатационных свойств.

-
1. Белов, Г.П. Поликетоны – чередующиеся сополимеры монооксида / Г.П. Белов // Успехи химии. – 2004. – Т. 73, № 3. – С. 292–319

ВЛИЯНИЕ ЛИГАНДА НА СОСТАВ И СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК ПЕРМАЛЛОЯ

Т.И. Усович, Т.И. Зубарь, А.Н. Котельникова, М.И. Панасюк,
А.А. Бондарук, А.А. Роткович, А.В. Труханов

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь; tanya_usovich@mail.ru

Введение. Сплав Ni–Fe (пермаллой) широко применяется в электронной промышленности, для записи и хранения информации в компьютерах и других областях техники благодаря своим ценным магнитным свойствам [1]. Помимо этого, одним из современных направлений применения сплавов Ni–Fe является экранирование электронных устройств от внешнего магнитного излучения [2, 3]. Поэтому необходимость в покрытиях, обладающих высокой коррозионной стойкостью, электропроводностью, улучшенными физико-механическими свойствами является актуальной задачей [4].

Цель работы — синтез образцов путем осаждения пленки пермаллоя на медные подложки из электролитов с разными комплексными соединениями при определенных плотностях тока, расчет скорости осаждения и изучение состава полученных образцов.

Материалы и методы. В качестве подложки использовалась медная фольга 6×4 сантиметра, с одной стороны заизолированная липкой лентой. Для очистки медной подложки от органических загрязнений промывали подложку с венской известью под проточной водой, а потом подложки опустили в персульфат аммония $((\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8)$ на 60 сек. Далее все подложки были тщательно промыты под проточной водой.

Осаждение пленки происходило в электролитах с составом: NiSO_4 (210 г/л), NiCl_2 (20 г/л), FeSO_4 (10 г/л), борная кислота (30 г/л), сахарин (2 г/л), аскорбиновая кислота (2 г/л), комплексообразователь (трилон Б — 30 г/л, цитрат натрия — 50 г/л, ацетат натрия — 50 г/л, ситетовая соль — 30 г/л), pH = 2,3, T = 35–38 °C. Осаждение проводилось при постоянном перемешивании электролита в гальваностатическом режиме ($i = 30, 40, 50 \text{ mA/cm}^2$) с временем осаждения 60 мин.

Была рассчитана скорость осаждения пленки. С помощью EDX был изучен состав исследуемых образцов.

Результаты и обсуждение. В данном эксперименте из электролитов с разными комплексообразователями были осаждены пленки при плотностях тока 30, 40 и 50 mA/cm^2 . На рис. 1 представлена влияние лиганда и плотности тока на скорость осаждения и состав пленок пермаллоя.

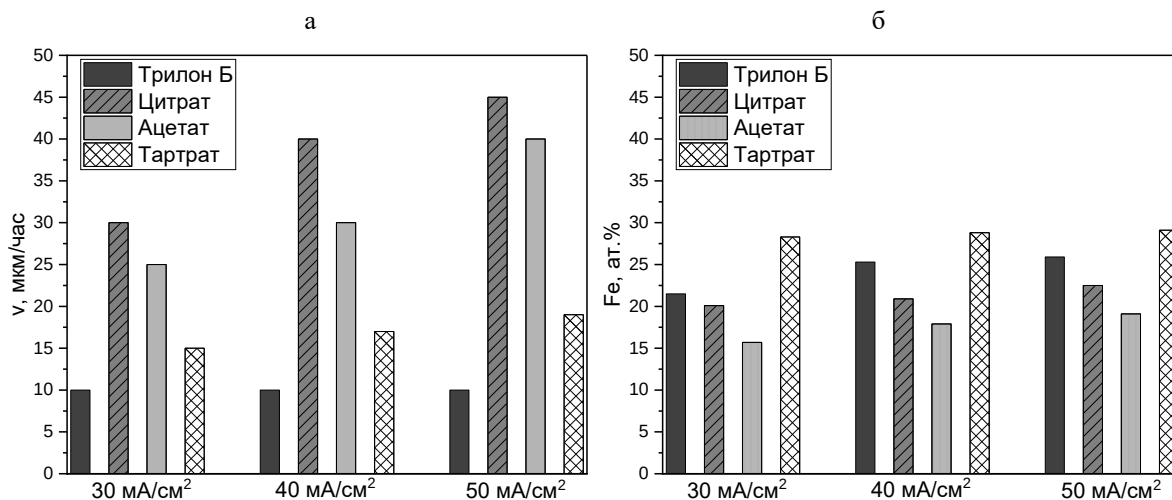


Рис. 1. Влияние типа лиганда и плотности тока на скорость осаждения (а) и содержание железа (б) пленок

На рис. 1, а можно увидеть, что при увеличении плотности тока скорость осаждения значительно повышается для цитратного и ацетатного электролитов, для тартратного изменяется незначительно, а для трилонатного практически не изменяется.

Так как лучшими свойствами для магнитного экранирования является сплав Ni80Fe20, то для получения пленок пермаллоя наиболее рационально использовать электролит на основе цитратов, так как при всех плотностях тока атомное содержание железа находится в районе 20 ат. %. Также можно получить сплав приемлемого состава из трилонатного электролита при плотности тока 30 mA/cm^2 , из ацетатного при плотности тока 50 mA/cm^2 . Следует отметить, что тартратный электролит вовсе не обеспечивает получение покрытия требуемого состава и, при этом, содержание железа значительно выходит за пределы допустимого (28 ат. %) (рис. 1, б).

Выводы. Получены пленки пермаллоя, рассчитана их скорость осаждения и изучен состав. В результате исследования проведен анализ скорости осаждения от состава электролита. Наибольшую скорость осаждения

при всех плотностях тока имеет цитратный электролит от 30 до 45 мкм/час. Так же были изучена зависимость содержания железа в пленке от видов комплексообразователя. Пленки, имеющие нужное содержание железа (20 %) получались из цитратного электролита. Был выявлен определенный состав электролита и параметры его осаждения для получения пленок Ni₂₀Fe₈₀.

1. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells. / S.S. Grabchikov [et al] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 49–53.
3. Electromagnetic shielding performance of carbon foams / F. Moglie [et al] // Carbon. – 2012. – Vol. 50. – P. 1972–1980.
4. В.И. Мамаев Никелирование: учебное пособие. Под ред. В.Н. Кудрявцева. / Мамаев В.И., Кудрявцев В.Н. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2014. – 192 с.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА КИНЕТИКУ ГИДРОЛИЗА ПОЛИ-L-ЛАКТИДА

А.А. Федоренко^{1,2,*}, С.В. Костюк^{1,2}, Е.В. Гринюк^{1,2}

¹Учреждение БГУ «НИИ физико-химических проблем», Минск, Беларусь; sashfedorenko@gmail.com

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Использование биodeградируемых полимеров может стать одним из путей решения проблемы загрязнения окружающей среды отходами пластиковой упаковки. Среди таких полимеров большой интерес представляет полилактид (ПЛ). Кинетика гидролиза ПЛ описывается уравнением псевдонулевого порядка. Это уравнение справедливо при выполнении ряда условий: концентрация воды и сложноэфирных групп принимается постоянной, а концентрация карбоксильных групп, катализирующих процесс гидролиза равной обратной среднечисловой молекулярной массе (M_n) ПЛ. Кроме того, принимается, что плотность ПЛ остается постоянной на всем протяжении гидролиза:

$$\ln M_{n,t} = \ln M_{n,0} - kt, \quad (1)$$

где k — это константа скорости гидролитической деструкции, а t — время гидролиза.

В рамках данного исследования гидролизу при 60 °С в дистиллированной воде подвергали пленки, полученные методом экструзии из промышленного поли-L-лактида, а также пленки, которые предварительно подвергли действию γ -облучения на воздухе. Их молекулярно-массовые характеристики исследовали методом гелепроникающей хроматографии. На основе полученных данных были построены зависимости логарифма M_n от продолжительности гидролиза ПЛ (t), позволяющие определить кинетические параметры процесса гидролиза.

Для всех образцов можно было выделить две области с различными кинетическими параметрами. На первом этапе гидролитическая деструкция протекала быстрее, после чего замедлялась. Для необлученного образца изменение кинетических параметров протекало на 30 день гидролиза, для облученного дозой 29 кГр на 10 день, а для облученного дозой 75 кГр на 5 день. Для данных образцов в это же время молекулярно-массовое распределение переходило из мономодального в бимодальное, что отражает кристаллизацию ПЛ в процессе гидролиза. Значения констант скорости на первом этапе (k_1) гидролиза лежали в диапазоне $(13\text{—}27) \cdot 10^{-2}$ дней⁻¹, они увеличивались с дозой, что связано с уменьшением молекулярной массы облученных образцов, а также с увеличением их гидрофильности. Значения констант на втором этапе (k_2) были на порядок ниже. На втором этапе облучение не приводило к значительным изменениям констант. Можно предположить, что k_1 преимущественно характеризует гидролиз аморфных областей ПЛ, а k_2 — кристаллических. Это подтверждается появлением бимодального распределения в момент изменения кинетических параметров процесса гидролиза, а также достижением высокой степени кристалличности по данным рентгеноструктурного анализа и Фурье-ИК спектроскопии. Эффективность гидролиза снижается при кристаллизации ПЛ в связи с тем, что скорость диффузии воды в кристаллических областях ниже, чем в аморфных. Более того, увеличение степени кристалличности приводит к увеличению плотности полимера, как следствие нарушается линейность функции, задаваемой уравнением 1, при выведении которого плотность принималась постоянной. Близкие значения k_2 для всех образцов связаны с тем, что к моменту достижения высоких степеней кристалличности молекулярная масса цепей определялась не предварительным облучением, а размером кристаллитов, сходным для всех образцов.

Таким образом, показано, что предварительное облучение приводит к увеличению скорости гидролиза поли-L-лактида. Однако при кристаллизации полимера происходит снижение константы скорости гидролитической деструкции примерно на порядок. Поскольку облучение также приводит к ускорению кристаллизации, при повышенных температурах гидролиза облучение не приводит к значительному сокращению времени деструкции ПЛ. Тем не менее, при температурах ниже температуры стеклования полимера, облучение будет эффективным способом увеличения скорости гидролиза ПЛ.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», по заданию 1.3.04.05 «Радиационно-химическое модифицирование структуры и свойств синтетических и природных биodeградируемых полимеров».

ФРОНТАЛЬНАЯ СОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ АКРИЛАМИДА С АКРИЛОНИТРИЛОМ В ПРИСУТСТВИИ СШИВАЮЩЕГО АГЕНТА В ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДЕ

Е.С. Мельничук¹, Е.С. Карасевич¹, В.Е. Бабуль¹, А.А. Федоренко², М.Б. Шуляковская¹,
Е.В. Гринюк²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; marieshulyakouskaja@gmail.com

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь

Введение. Основным способом получения сополимеров акриламида (АА) является метод радикальной сополимеризации в растворе [1]. Намного реже встречается такой метод, как фронтальная полимеризация (ФП). Под ФП понимается процесс превращения мономера в полимер в локализованной реакционной зоне, перемещающейся по всему объему благодаря химическому тепловыделению и теплопроводности среды [2].

Необходимыми условиями протекания ФП являются экзотермичность реакции и низкая скорость ее протекания при начальной температуре и высокая скорость реакции при температуре фронта, так, чтобы скорость тепловыделения превышала скорость теплопотерь. При соблюдении этих условий реакция ФП после инициирования не требует дополнительного нагревания, что уменьшает энергозатраты [3].

Полиэлектrolитные гидрогели (ПЭГГ) на основе сополимеров АА и акрилонитрила (АН) используются для изготовления изделий медицинского назначения — цервикальных расширителей. Традиционный метод получения таких гидрогелей — частичный гидролиз полиакрилонитрила. Однако в литературе практически отсутствуют сведения о получении гидрогелей путем фронтальной сополимеризации АА с АН с одновременным сшиванием цепей сополимера.

Цель исследования — получение гидрогелей при сополимеризации АА с АН во фронтальном режиме в растворах диметилсульфоксида (ДМСО) в присутствии сшивающего агента, а также изучение макрокинетических параметров процесса.

Материалы и методы. В качестве мономеров использовали АА и АН; инициатора — персульфат аммония (ПСА); сшивающего агента — N,N'-метиленисакриламид (МБАА).

Синтез ПЭГГ проводили методом фронтальной сополимеризации АА и АН при различной концентрации мономеров в присутствии ПСА и МБАА. Соотношение «сомомеры : растворитель» оставалось постоянным и равнялось 60 : 40 мол. %. Соотношение АА и АН составляло 90 : 10 и 75 : 25 мол. % соответственно. Концентрация МБАА варьировалась от 0,1 до 1,25 мол. %, концентрация ПСА — от 0,1 до 2 мол. %. Скорость распространения фронта определяли измерением расстояния, пройденного фронтом за определенный временной интервал. Температуры полимеризационных фронтов измерялись при помощи термopары К-типа.

Результаты и их обсуждение. Была изучена возможность проведения процесса сополимеризации во фронтальном режиме и макрокинетические параметры процесса при различных концентрациях сшивающего агента или инициатора.

В табл. 1 приведены характеристики процесса фронтальной сополимеризации АА и АН при различных концентрациях сшивающего агента.

Таблица 1. Макрокинетические параметры процесса фронтальной сополимеризации АА и АН при варьировании концентрации сшивающего агента (концентрация ПСА — 1 мол. %)

МБАА, мол. %	90 мол. % АА : 10 мол. % АН		75 мол. % АА : 25 мол. % АН	
	температура фронта, °С	скорость фронта, см/мин	температура фронта, °С	скорость фронта, см/мин
0,1	144,0	2,7	135,5	1,1
0,5	159,7	3,5	158,9	2,0
1	159,6	3,3	161,0	4,3
1,25	152,9	2,5	154,1	2,4

Из табл. 1 видно, что увеличение содержания МБАА приводит сначала к возрастанию и температуры и скорости фронта, которые с дальнейшим увеличением концентрации МБАА снижаются.

Максимальная скорость распространения фронта в системе, содержащей 90 : 10 мол. % АА : АН, составила 3,5 см/мин при 0,5 мол. % МБАА; при этих же условиях зафиксирована максимальная температура

фронта — 159,7 °С. Во второй системе максимальная скорость распространения фронта составила 4,3 см/мин при 1 мол. % МБАА. Температура фронта достигла 161,0 °С, также являясь максимальной.

При исследовании процесса ФП с фиксированной концентрацией МБАА, но при разных концентрациях ПСА соотношение мономеров АА : АН составляло 75 : 25 мол. %.

В табл. 2 приведены макрокинетические параметры процесса фронтальной сополимеризации АА и АН в зависимости от концентрации инициатора.

Таблица 2. Макрокинетические параметры процесса фронтальной сополимеризации АА и АН при варьировании концентрации инициатора (концентрация МБАА — 1 мол. %)

ПСА, мол. %	75 мол. % АА : 25 мол. % АН	
	температура фронта, °С	скорость фронта, см/мин
0,1	133,7	0,79
0,25	146,9	1,25
0,5	150,5	1,63
2	151,8	3,79

Из табл. 2 видно, что с увеличением концентрации ПСА наблюдается увеличение и скорости фронта, и его температуры, что характерно для процесса ФП. Максимальные температура и скорость фронта зафиксированы при концентрации ПСА 2 мол. %.

Выводы. Показана принципиальная возможность получения сополимеров АА и АН и ПЭГТ на их основе в растворе ДМСО в режиме ФП. Определены макрокинетические параметры процесса ФП АА с АН при различных мольных соотношениях мономеров, концентрациях инициатора и сшивающего агента. Установлено, что повышение концентрации инициатора приводит к возрастанию температуры и скорости полимеризационного фронта.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Многофункциональные и композиционные материалы», задание 8.4.2.14 «Разработка методов фронтальной сополимеризации акриловых мономеров в непрерывном режиме».

1. Durmaz, S., Okay, O. Acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid sodium salt-based hydrogels: synthesis and characterization // Polymer. – 2000 (**41**), 3693–3704
2. Гринюк, Е.В. [и др.] Получение сополимеров акриламида и 2-акриламида-2-метилпропансульфонокислоты методом фронтальной полимеризации // Журнал прикладной химии. – 2014 (**87**), № 12, 1841–1845.
3. Pojman, J. A. [et al.] Frontal Polymerization in Polymer Science: A Comprehensive Reference // Elsevier BV: Amsterdam. – 2012, 957–980.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГЛЮКОЗЫ, ОСАЖДАЕМЫХ ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Лю Имин, С.А. Фролов

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; sftex@mail.ru

Наиболее часто тонкие покрытия используются для придания различным материалам и изделиям антибактериальных, противогрибковых и противовирусных свойств. При этом существует и обратная не менее актуальная задача, заключающаяся в необходимости стимулирования роста только определенных микроорганизмов. Рост других микроорганизмов должен быть ингибирован. В ряде случаев в качестве питательного компонента, стимулирующего рост микроорганизмов, применяют глюкозу.

Цель работы — исследование молекулярной структуры покрытий на основе глюкозы, осаждаемых потоком низкоэнергетических электронов в вакууме.

Материалы и методы. Покрытия формировали воздействием потока низкоэнергетических электронов на порошок глюкозы [1]. Начальное давление остаточных газов в вакуумной камере $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ Па. Химический анализ покрытий определяли методом РФЭС. ИК исследования выполнялись на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) с использованием стандартной ячейки на пропускание. Для установления влияния термообработки на молекулярную структуру покрытия использовали термоячейку на пропускание. Скорость нагрева соответствовала 10 °/мин. Спектры регистрировались в диапазоне волновых чисел (4000—400 см⁻¹) с разрешением 4 см⁻¹. УФ-Вид спектроскопические исследования проводили с использованием спектрофотометра Cary-50 (Varian). Значение ширины запрещенной зоны E_g определяли на основании анализа оптических спектров поглощения [2].

Результаты и их обсуждение. ИК-спектре покрытия присутствуют все полосы поглощения, характерные для исходного порошка глюкозы. При этом в ИК-спектре покрытия присутствует слабое поглощение при 811 см^{-1} , не характерное для глюкозы. Отмеченная полоса поглощения характерна для фуранового кольца (пульсационные колебания кольца) [3]. Известно, что образование производных фурана происходит при карамелизации сахаров. Термообработка покрытия сопровождается заметным повышением оптической плотности полосы при 811 см^{-1} . Нагрев покрытия ($> 150\text{ °C}$) сопровождается снижением оптической плотности всех полос в ИК-спектре. Это является следствием деструкции молекулярной структуры тонкого слоя.

Согласно РФЭС анализу в молекулярной структуре покрытия присутствует большое количество C–C (sp^2) связей. Их содержание превышает более чем в 2,9 раза содержание аналогичных связей в молекулярной структуре исходной глюкозы. При этом в покрытии более чем в 1,5 раза снижена доля C–C (sp^3) / C–H связей, а также снижено содержание гидроксильных групп. Результаты исследований указывают на частичное разрушению пиранозного цикла потоком низкоэнергетических электронов. Основным результатом деструкции является образование углеродных графитоподобных фрагментов. Низкотемпературный (121 °C) отжиг не приводит к заметному изменению молекулярной структуры тонкого слоя.

Рассмотрено влияние температуры отжига на электронные спектры покрытий на основе глюкозы (рис. 1). Для покрытия значение ширины запрещенной зоны равно $3,93\text{ эВ}$. Возможность определения значения E_g обусловлена присутствием в составе тонкого слоя углеродных частиц. Покрытие на основе глюкозы может рассматриваться как композиционный слой: в органической матрице располагаются углеродсодержащие продукты деструкции молекул полисахарида. С увеличением температуры отжига наблюдается снижение величины E_g . Результат может являться следствием увеличения размера углеродных образований. Следует отметить, что визуально на реализацию карбонизацию слоя глюкозы при отжиге указывает и приобретаемый покрытием в процессе термообработки коричневый оттенок. Покрытие на основе глюкозы даже после термообработки легко растворяется в теплой воде. Результат полностью согласуется с данными ИК- и РФЭС исследований.

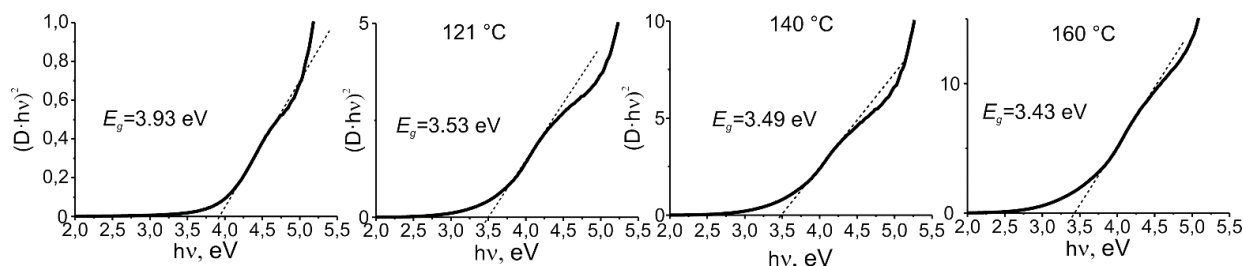


Рис. 1. Влияние температуры отжига (30 мин) на величину E_g покрытий на основе глюкозы

В электронном спектре покрытия на основе глюкозы фиксируется две выраженных полосы поглощения с максимумами при 226 и 284 нм (рис. 2).

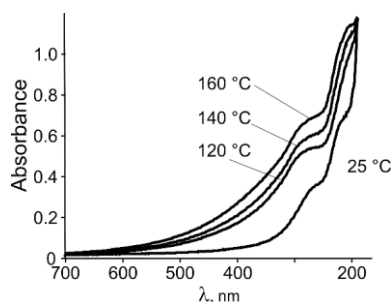


Рис. 2. Влияние температуры отжига на электронные спектры покрытий на основе глюкозы

Поглощение связывают с присутствием в молекулярной структуре дезоксигексозы и 5-гидроксиметилфурфуrolа [4]. Это является одним из доказательств реализации процесса карамелизации глюкозы.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехнологии («Наноструктура»); и ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганическая химия, подпрограмма «Синтез и направленная модификация регуляторов биопроцессов»».

1. Y. Liu, A.V. Rogachev, V.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, X.-H. Jiang, D. Sun, J. Xiao, M.A. Yarmolenko, The structure and properties of bioactive multilayer coatings applied by a low-energy electron beam on the implant surface, Surface and Coatings Technology. – 2019 (378), 124969.

2. Y. Liu, X. Qin, A.V. Rogachev, A.A. Rogachev, I.I. Kontsevay, A.E. Pyzh, Xiaohong Jiang, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, M.A. Yarmolenko, Structure and properties of microcellulose-based coatings deposited via a low-energy electron beam and their effect on the properties of wound dressings, Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. – 2021 (2), 100146.
3. Infrared Absorption Spectroscopy. K. Nakanishi. Tokyo Kyoiku University. Holden-Day, Inc., San Francisco, 1962, 233 p.
4. H. Xu, Z. Wang, J. Huang, Y. Jiang, Thermal Catalytic Conversion of Biomass-Derived Glucose to Fine Chemicals, Energy Fuels. – 2021 (35), 8602–8616.

УЛЬТРАТОНКИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИСАХАРИД-АГ

Е.О. Чекановская, А.Е. Гилевская, В.В. Николайчук

ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси», Минск, Беларусь;
elizaveta.chekanovskaya@gmail.com

Введение. Природные полимеры, такие как хитозан и пектин, обладают широким спектром биологической активности и относятся к экологически безопасным веществам. Их способность к пленкообразованию позволяет использовать их в качестве мультифункционального полимерного носителя для наночастиц (НЧ) серебра. Подобные композиционные материалы устраняют недостатки каждого компонента в отдельности и проявляют выраженный физиологический эффект, что позволяет использовать их в медицине и ветеринарии.

Материалы и методы. НЧ серебра, стабилизированные хитозаном (X_1 и X_2) и пектином ($П_{Ag}$), синтезировали по ранее разработанным методикам [1,2]. Значения ξ -потенциала синтезированных НЧ определяли по электрофоретической подвижности методом динамического светорассеивания (Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, U.K.)).

Ультратонкие пленки $(X_1/П)_n$, $(X_2/П)_n$, $(X_1/П_{Ag})_n$, $(X_2/П_{Ag})_n$ (где n — число бислоев, равное 10) формировали методом послойного осаждения полиэлектролитов. В качестве полианиона использовали пектин Classic ($П$) и $П_{Ag}$, а в качестве поликатиона — X_1 и X_2 . Используемые растворы нормировали по концентрации полимера (5 мг/мл). Закономерности адсорбции изучали методом кварцевого микровзвешивания (QSense Analyzer). Краевые углы смачивания (θ) определяли методом лежащей капли. Морфологию поверхности полученных пленок исследовали методом атомно-силовой микроскопии.

Результаты и обсуждение. Установлено, что НЧ $П_{Ag}$, так же, как и исходный пектин, заряжены отрицательно в диапазоне pH от 2 до 13, величина ξ -потенциала составила ($|30 \div 50|$ мВ). НЧ X_1 и X_2 заряжены положительно вплоть до pH 9. Синтезированные гидрозоли НЧ $П_{Ag}$, X_1 и X_2 являются седиментационно и агрегативно устойчивыми и имеют максимальное значение ξ -потенциала ($\geq |30|$ мВ) для всех типов синтезированных НЧ, находящееся в диапазоне pH $5,0 \div 6,0$.

Методом кварцевого микровзвешивания определены основные количественные закономерности адсорбции полимерных пленок $(X_1/П)_{10}$, $(X_2/П)_{10}$, $(X_1/П_{Ag})_{10}$, $(X_2/П_{Ag})_{10}$. При получении мультислойных пленок происходит изменение частоты колебаний резонатора пропорционально массе адсорбированного на его поверхности слоя. Анализ зависимости $\Delta F = f(\Delta D)$ при чередующейся адсорбции полиэлектролитов свидетельствует о том, что сформированные мультислои не являются жесткими, а оказывают вязкоэластичную нагрузку на резонатор. Толщина и масса пленок $(X_1/П)_{10}$ и $(X_2/П)_{10}$ возрастают экспоненциально ($R^2 = 0,975$ и $0,955$ соответственно) с увеличением числа бислоев, в отличие от покрытий $(X_1/П_{Ag})_{10}$ и $(X_2/П_{Ag})_{10}$, для которых эта зависимость имеет линейный характер ($R^2 = 0,994$ и $0,995$ соответственно) (рис., табл.). Полученные значения толщины и массы пленок $(X_1/П)_{10}$ и $(X_2/П)_{10}$ превышают таковые для пленок $(X_1/П_{Ag})_{10}$ и $(X_2/П_{Ag})_{10}$ в 5 и 11 раз соответственно.

Сформированные мультислойные пленки являются гидрофильными, значение θ находятся в диапазоне $15\text{—}37^\circ$ (табл.). Гидрофильность, по-видимому, обусловлена свободными карбоксильными группами пектина на поверхности пленки.

Установлено, что на поверхности полученных покрытий практически не происходит адсорбции бычьего сывороточного альбумина (значение $\Delta F \sim 0,5\text{—}3,0$ Гц), что делает данные пленки потенциально пригодными для использования в качестве биорезистентных покрытий медицинских изделий.

Согласно данным, полученным методом АСМ, мультислойные покрытия имеют однородную, бездефектную, хорошо структурированную зернистую поверхность. Показатель шероховатости поверхности (R_{ms}) для всех типов пленок составляет $5\text{—}12$ нм. Латеральный размер «зерна» покрытий $(X_1/П)_{10}$ и $(X_2/П)_{10}$ составляет $\sim 20\text{—}50$ нм с отдельными аморфными агрегатами свыше 100 нм. Покрытия $(X_1/П_{Ag})_{10}$ и $(X_2/П_{Ag})_{10}$ имеют «зерна» $\sim 15\text{—}20$ нм, что сопоставимо с размером индивидуальных НЧ $П_{Ag}$.

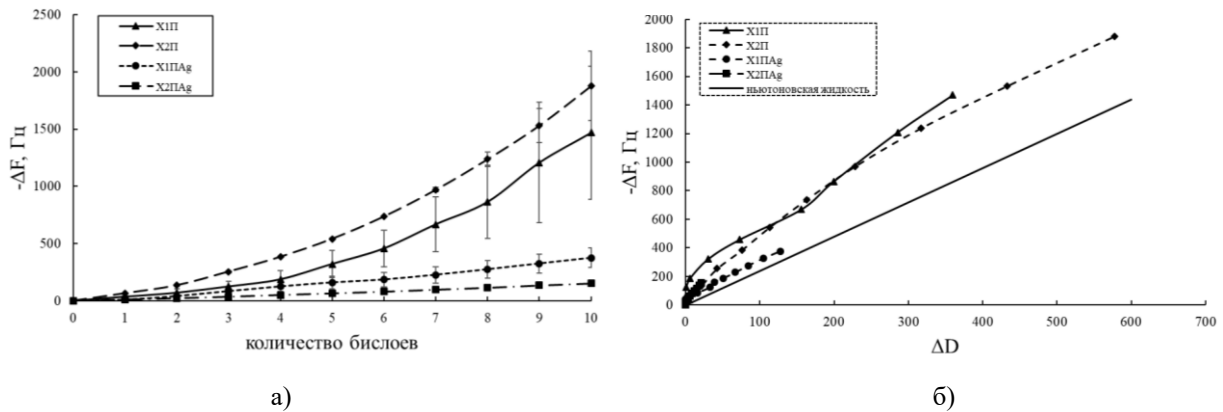


Рисунок. Зависимость частоты колебаний (F) кварцевого резонатора от числа бислов (а) и диссипации D (б) при формировании пленок.

Таблица. Характеристики полученных биополимерных покрытий

	Вязкость, $\cdot 10^3$ кг/мс	Толщина, нм	Масса, мкг/см ²	θ , °
X ₁ П	21,74 ± 10,40	282,5 ± 68,4	31,07 ± 7,52	15,16 ± 0,98
X ₁ П _{Ag}	3,83 ± 0,56	60,5 ± 14,2	6,66 ± 1,56	27,85 ± 0,67
X ₂ П	29,856 ± 3,17	301,7 ± 48,5	33,19 ± 5,33	19,15 ± 3,04
X ₂ П _{Ag}	2,91 ± 0,27	24,6 ± 0,91	2,71 ± 0,10	37,67 ± 4,02

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция» и БРФФИ (грант №Б21В-002/01).

1. Kulikouskaya V., Hileuskaya K., Kraskouski A. et al / Chitosan capped silver nanoparticles: A comprehensive study of polymer molecular weight effect on the reaction kinetic, physicochemical properties and synergetic antibacterial potential // SPE Polymers. – 2022 (3), № 2 – P. 77–90.
2. Hileuskaya K., Ladutska A., Kraskouski A. et al / ‘Green’ approach for obtaining stable pectin-capped silver nanoparticles: physico-chemical characterization and antibacterial activity // Colloids Surf. A. – 2020 (585), 124141.

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ СЕРОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ НАМОРАЖИВАНИЯ

Ю.Д. Черняков, А.Н. Жигалов

Институт технологии металлов НАН Беларуси, Могилев, Беларусь; yuchi.osn@gmail.com

Полые цилиндрические заготовки из серого чугуна широко применяются в машиностроении для изготовления различных деталей широкой номенклатуры: гильз цилиндров, поршневых и уплотнительных колец, подшипников скольжения и т.п.

Одним из перспективных методов, обеспечивающих получение полых цилиндрических отливок с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами, является непрерывно-циклическое литье намораживанием. Применение данного метода обеспечивает направленное затвердевание, которое оказывает положительное влияние на качество и эксплуатационные характеристики полых цилиндрических заготовок из серого чугуна, ставит его в разряд высокоэффективных конструкционных материалов и значительно расширяет область его применения.

Сущность литья намораживанием заключается в следующем: расплав заливается через сифонную литниковую систему в кристаллизатор, где он затвердевает в одностороннем направлении от периферии к центру. После формирования стенки необходимой толщины — отливка извлекается из кристаллизатора, и охлаждается с заданной скоростью для получения необходимой структуры. Температура извлекаемой отливки составляет около 1000 °С, что дает дополнительные возможности для воздействия и управления процессами структурообразования [1].

Рост требований к качеству материалов в машиностроении требует оптимизации структуры и свойств литых изделий. Для повышения свойств литых материалов используют различные методы энергетического воздействия как на процесс кристаллизации, так и непосредственно на структуру в литых заготовках.

Аэродинамическое звуковое упрочнение является одним из новых методов повышения свойств, применяемых для твердых сплавов. Принципиальная схема метода заключается в следующем: на предварительно

нагретый образец воздействуют резонансными акустическими волнами звуковой частоты внутри специальной камеры.

Проведенные научные исследования показали, что разработанный метод приводит к уменьшению количества пор в структуре твердых сплавов, дроблению и перераспределению фаз карбида и уменьшению дислокаций внутренней структуры за счет релаксации дефектов в кристаллических решетках компонентов [2].

В процессе предварительных исследований по определению возможности расширения области применения метода аэродинамического звукового воздействия установлено повышение на 2—5 % механических свойств (прочность на растяжение, на излом, на сжатие, ударная вязкость) серых чугунов в полых цилиндрических отливках, полученных методом намерзания.

1. Марукович Е.И. Принципиально новый эффективный процесс литья полых цилиндрических заготовок из чугуна методом направленного затвердевания / Е.И. Марукович, В.Ф. Бевза, В.П. Груша // Литье и металлургия. – 2010. – № 3(56). – С. 21–24
2. Жигалов, А.Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А.Н. Жигалов, В.К. Шелег. – Могилев: МГУП, – 2019. – 213 с.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ НАНОФИЛЬТРАЦИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ МЕЖФАЗНОЙ ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ

С.С. Шиканов, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич

ГНУ «Институт физико-органической химии НАН Беларуси», Минск, Беларусь; shikanov.ifoh@mail.ru

Введение. Развитие мембранных технологий водоочистки и водоподготовки для технических, производственных, фармацевтических, сельскохозяйственных и бытовых нужд позволяет снизить материало- и энергоемкость процессов разделения. Мембранные процессы разделения являются экологически чистыми и безреагентными технологиями. Актуальной задачей мембранного материаловедения является разработка эффективных мембран для нанофильтрации методом формирования полиамидного селективного слоя межфазной поликонденсацией.

Цель работы — установление влияния добавки полиакриловой кислоты (ПАК) в осадительную ванну при получении мембран на основе полиакрилонитрила (ПАН) и полисульфона (ПС) на транспортные свойства композиционных мембран для нанофильтрации, полученных методом межфазной поликонденсации.

Материалы и методы. Поли(акрилонитрил-со-метилакрилат) (ПАН, $M_w = 80 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, соотношение звеньев акрилонитрила и метилакрилата — 94:6, Dolan, Германия) и полисульфон (ПС, $M_w = 45\text{—}55 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, Ultrason S 6010, BASF, Германия) использовались для получения мембран-подложек для композиционных мембран для нанофильтрации. Пористые мембраны-подложки были получены методом инверсии фаз способом мокрого формования при использовании воды или 0,5 % водного раствора полиакриловой кислоты (ПАК, $M_n = 450 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$) в качестве осадительной ванны. Композиционные мембраны для нанофильтрации были получены методом формирования тонкого селективного слоя на поверхности пористой мембраны подложки методом межфазной поликонденсации (МП). В качестве ацильного компонента в реакции МП использовали тримезоилхлорид (1,3,5-бензолтрикарбонилтрихлорид, ТМС) (0,8 мас. % в нефрас-С2 80/120). В качестве аминных компонентов использовали 1-(2-аминоэтил)пиперазин (1-(2-АЭ)-П, тетраэтиленпентамин (ТЭПА), полиэтиленимин (ПЭИ, $M_w = 25 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, Германия) (1 мас. % в воде). Соотношение моль-экв. амин/ТМС при получении селективного слоя методом МП на основе ТЭПА составило 31,1, а на основе 1-(2-АЭ)-П — 18,1.

Результаты и обсуждение. Установлено, что добавление 0,5 мас. % ПАК в осадительную ванну при формировании пористых мембран-подложек в зависимости от используемого амина оказало различное влияние на транспортные свойства нанофильтрационных мембран, полученных методом межфазной поликонденсации (табл. 1). В случае использования ТЭПА и 1-(2-АЭ)-П наблюдалось уменьшение значения удельной производительности по воде ($J(\text{H}_2\text{O})$) и раствору сульфата магния с концентрацией $2 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, а коэффициент задерживания (R) по MgSO_4 увеличивался. В случае использования ПЭИ в качестве аминного компонента наблюдалась противоположная зависимость: удельная производительность по воде и раствору сульфата магния увеличивалась, а коэффициент задерживания по сульфату магния уменьшался. При модификации мембраны-подложки ПАК макромолекулы сильно разветвленного ПЭИ, по-видимому, неравномерно импрегнируют поверхность селективного слоя, вследствие чего полиамидный слой получается неоднородным и дефектным, что и вызывает наблюдаемое понижение коэффициента задерживания по MgSO_4 и увеличение удельной производительности как по воде, так и по раствору соли. Неравномерное импрегнирование связано с локализацией макромолекул ПЭИ в местах иммобилизации карбоксильных групп ПАК. Из-за макромолекулярной природы ПЭИ аминные группы оказываются неравномерно зафиксированными на поверхности селективного слоя, что препятствует формированию равномерного бездефектного полиамидного слоя при их реакции с ТМС.

Таблица 1. Транспортные свойства нанофильтрационных мембран

Мембрана		J(H ₂ O), л/м ² ч	J(MgSO ₄), л/м ² ч	RMgSO ₄ , %
Амин	Ванна			
ПАН ΔР = 5 атм., Т = 20 °С, перемешивание				
ТЭПА	Вода	294	143	62
	0,5 % ПАК	48	34	84
ПЭИ	Вода	16	11	84
	0,5 % ПАК	22	20	78
ПС ΔР = 5 атм., Т = 20 °С, перемешивание				
ТЭПА	Вода	36	30	82
	0,5 % ПАК	17	12	87
1-(2-АЭ)-П	Вода	18	12	78
	0,5 % ПАК	11	10	81
ПЭИ	Вода	27	22	84
	0,5 % ПАК	32	21	67

Как видно из табл. 1, в случае использования ПЭИ указанная закономерность характерна для обеих использованных мембран-подложек как на основе ПС, так и на основе ПАН.

В тоже время, при использовании низкомолекулярных многофункциональных аминов ТЭПА и 1-(2-АЭ) уменьшение удельной производительности по воде и по раствору MgSO₄ с увеличением коэффициента задерживания, обусловленное образованием относительно равномерного тонкого полиамидного слоя (рис. 1)

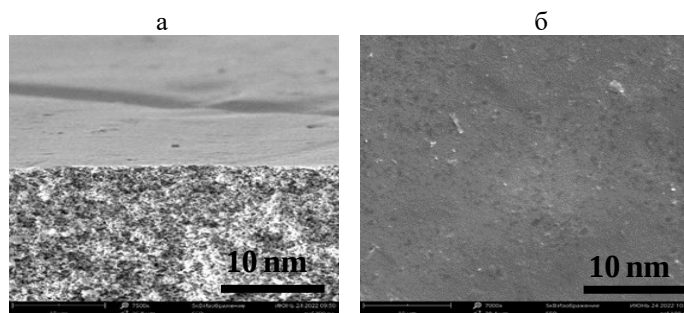


Рис. 1. Микрофотографии, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, нанофильтрационных мембран (мембрана-подложка — ПС, амин — ТЭПА): а — скол поперечного сечения; б — поверхность селективного слоя

Выводы. Установлено, что введение добавок ПАК в осадительную ванну существенно влияет на производительность и коэффициент задерживания нанофильтрационных мембран в зависимости от структуры используемого амина при межфазной поликонденсации. В случае низкомолекулярных аминов иммобилизация карбоксильных групп на поверхности селективного слоя мембраны-подложки приводит к увеличению равномерности ее импрегнирования амином и формированию более равномерного полиамидного слоя методом МП. В случае ПЭИ наблюдается противоположная зависимость.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ (№ X22КИ-036).

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И МНОГОУРОВНЕВАЯ ФИЛЬТРУЮЩАЯ СРЕДА

В.Ю. Шумская

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
viktoriya-shumsk@mail.ru

Введение. Разработка фильтров для защиты органов дыхания от бактериально-вирусных загрязнений представляет собой комплексную проблему [1]. При ее решении важнейшим является выбор оптимальной комбинации по-разному структурированных волокнисто-пористых слоев. Любой волокнисто-пористый фильтр имеет свой «потолок» эффективности механического фильтрования. Поэтому на первый план выдвигается потребность в максимальной степени интенсифицировать межфазные взаимодействия в системе

«фильтр — загрязнение». Например, следует способствовать усилению роли поверхностных эффектов, которые способны реализовать полимерные волокна.

Цель работы — исследование и интерпретация роли модифицирования полимерных волокнисто-пористых фильтрующих материалов как фактора повышения уровня их эффективности при очистке воздуха от бактериальных загрязнений.

Материалы и методы. Исследовали экспериментальные образцы фильтров, в разном порядке скомпонованные из полимерных волокнисто-пористых материалов: спанбонд (полипропилен ПП, ОАО «СветлогорскХимволокно»), пневмоэкструзионный melt-blown (МБ) материал (ПП, ОАО СветлогорскХимволокно), материал Грифтекс (политетрафторэтилен ПТФЭ, в условиях вакуумной абляции осажденный на ткань, ИММС НАН Беларуси), иглопробивной материал Фибан V (ионообменное волокно из полиакрилонитрила ПАН, ИФОХ НАН Беларуси). Материалы МБ и Грифтекс подвергали модифицированию путем электризации в коронном разряде с целью создания многоуровневой электрретной фильтрующей среды с эффектом комбинированного действия на загрязнения. Эффективную поверхностную плотность электрретного заряда определяли с помощью прибора ИПЭП-1. Эффективность бактериальной фильтрации (штамм *Staphylococcus aureus* ATCC 6538) исследовали в соответствии с ГОСТ Р 58396-2014 и EN 14683:2019+АС на 4 вариантах образцов).

Результаты и их обсуждение. Для материала МБ характерен сформировавшийся в процессе пневмоэкструзии электрретный заряд отрицательной полярности с плотностью около $0,2 \text{ мкКл/м}^2$. Путем коронозлектризации плотность заряда удалось повысить до значений $0,8—1,0 \text{ мкКл/м}^2$ (далее МБ(-)). Материалу Грифтекс также присущ возникший в ходе лазерной абляции ПТФЭ электрретный заряд отрицательной полярности с величиной плотности $0,20—0,25 \text{ мкКл/м}^2$. Путем коронозлектризации в поле коронного разряда положительной полярности Грифтекс удалось «перезарядить», придав ему электрретный заряд положительной полярности с плотностью $0,6—1,5 \text{ мкКл/м}^2$ (далее Грифтекс(+)). На рис. 1 представлено сравнение эффективности бактериальной фильтрации с помощью материалов с различным сочетанием слоев и разным уровнем активности волокон по отношению к дисперсным загрязнениям. Установлено, что наивысшей фильтрационной способностью обладают варианты сочетаний волокнисто-пористых материалов, в которых сформирована комбинированная фильтрующая среда с разнонаправленно действующими электрретными зарядами.

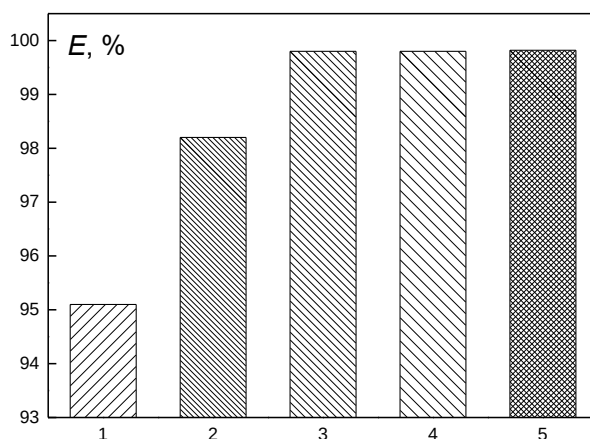


Рис. 1. Эффективность бактериальной фильтрации по типам образцов: 1 — МБ; 2 — МБ-ФибанV-МБ; 3 — Спанбонд-МБ(-)-ФибанV-Грифтекс(+)-Спанбонд; 4 — МБ(-)-ФибанV-Грифтекс(+)-Спанбонд (каландрированный); 5 — Спанбонд-МБ(-)-Грифтекс(+)-Спанбонд

Наличие разности абсолютных значений плотностей электрретных зарядов (то есть целенаправленное формирование градиента плотности заряда) позволяет достичь эффективности бактериальной фильтрации вплоть до 99,8 % (образцы 3, 4, 5 из рис. 1). Это значение находится на уровне наиболее высоких показателей средств индивидуальной защиты органов дыхания класса FFT3. Материала Фибан также вносит вклад в фильтрацию, вероятно, за счет реализации ионообменных процессов, хотя их роль является побочной.

Это иллюстрирует обоснованность создания многоуровневой фильтрующей среды [2]. Каждый волокнисто-пористый слой должен представлять собой особый уровень, который способен осуществлять специфическое воздействие на загрязнения, причем комбинация этих воздействий должна вести к необратимому захвату загрязнений, включая бактериальные. В развитие этой идеи следует варьировать не только типы волокнисто-пористых слоев, но и уровень их физической и физико-химической активности. В тех случаях, когда механический захват загрязнений недостаточно эффективен, включаются факторы поверхностной активности волокон — например, электрретный заряд различной полярности и/или хемосорбция. Поскольку захват загрязнений волокнисто-пористыми материалами является неравновесным процессом, также следует создать в материале градиент свойств — не только пористости и плотности, но и активности. В этом случае

загрязнения попадают в ловушку разнонаправленных сил, с высокой гарантией способствующих их осаждению.

Выводы. Выполнение требования к созданию высокоэффективных средств индивидуальной защиты органов дыхания возможно путем выбора оптимальных способов модифицирования полимерных волокнисто-пористых материалов и их чередования в слоистых конструкциях. Благодаря сочетанию рецептурно-технологических решений оказывается возможным создать многоуровневую фильтрующую среду, обеспечивающую очистку воздуха от загрязнений на уровне, соответствующем мировым аналогам.

Работа выполнена в рамках гранта БРФФИ № 21КОВИД-023.

1. Кравцов А. Г., Гольдаде В. А., Зотов С. В. Полимерные электреты для защиты органов дыхания. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2003.
2. Шумская В. Ю. [и др.]. Тенденции и перспективы использования полимерных волокнисто-пористых фильтров в составе средств индивидуальной защиты органов дыхания для предупреждения вирусной инфекции COVID-19 // Полимерные материалы и технологии. — 2022 (8), № 3, 6—23.

ГИДРАТЦЕЛЛЮЛОЗНЫЕ ВОЛОКНА, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ РАСТВОРОВ ЦЕЛЛЮЛОЗ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТЕ

Е.М. Татаринов, А.Э. Якас, Т.А. Савицкая

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; home2451681@gmail.com

Введение. Согласно статистическим данным потребность в текстильных волокнах к 2030 году составит 133,5 млн т. При этом потребление целлюлозных волокон возрастет с нынешних 3,7 кг на душу населения до 5,4 кг. Однако мощности по производству хлопка уже нельзя расширить, поскольку производство хлопка потребляет значительное количество воды и требует высококачественных пахотных земель и, таким образом, составляет серьезную конкуренцию выращиванию пищевых культур. В то же время современное производство экологически чистых и биоразлагаемых гидратцеллюлозных волокон, в основе которого лежит вискозный процесс, сильно загрязняет окружающую среду что приводит к закрытию таких производств в разных странах. В итоге, как показывают прогнозы, дефицит по целлюлозным волокнам составит 15 млн т в год [4].

Это обстоятельство открывает новые перспективы для производства искусственных целлюлозных волокон и делает исследования в данном направлении актуальными.

Действительно реальной альтернативой вискозному процессу сегодня может быть новая бессероуглеродная технология получения гидратцеллюлозных формованных изделий с использованием ортофосфорной кислоты в качестве растворителя целлюлозы [6]. Технология была испытана на опытно-промышленной установке ОАО «СветлогорскХимволокно» [1]. Важным преимуществом процесса является возможность использования отработанной осадительной ванны, представляющей собой 40 % раствор смеси моно- и дигидрофосфатов калия в качестве эффективного удобрения, что соответствует принципам «зеленой» химии.

Цель работы — получение гидратцеллюлозных волокон из растворов в ортофосфорной кислоте целлюлоз различного происхождения и сравнение их физико-химических свойств и структуры.

Материалы и методы исследования. Для приготовления прядильных растворов были использованы целлюлозы, полученные по сульфатному способу из древесины лиственных (СП 1500) и хвойных пород (СП 1100 и 1160) и целлюлоза производства Светлогорского ЦБК. Растворение целлюлоз осуществляли по новому «холодному» методу, который в отличие от разработанного ранее [1] отличается более простым температурным режимом, поскольку предполагает проведение растворения только при одной температуре вместо двух. Концентрация растворов целлюлоз в ортофосфорной кислоте составляла 6 %.

Механические характеристики полученных волокон оценивали на универсальной настольной электронной испытательной машине Zwick Z0.5 TS с программным обеспечением testXpert. Рентгенографическое исследование образцов осуществляли на рентгеновском дифрактометре HZG 4A (CuK α излучение, Ni-фильтр) в области углов $2\theta = 5\text{—}30^\circ$ с шагом 0.05° . Спектральные исследования были проведены на ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием Nicolet iS10 производства компании Thermo Scientific. Термогравиметрический анализ и дифференциальная сканирующая калориметрия образцов были выполнены на приборе NETZSCH STA449 C (Германия). Масса образцов — 5—10 мг, интервал съёмки 20—600 °C, скорость нагрева — 10 °C/мин, анализ проводился в атмосфере азота и воздуха.

Результаты и их обсуждение. Полученные волокна отличаются гладкой поверхностью, имеют округлый поперечный срез и по прочности превосходят вискозные волокна. Прочность на разрыв экспериментальных волокон составляет от 21 до 34 сН/текс. Результаты термического анализа свидетельствуют, что потеря

физически адсорбированной воды полученными волокнами начинается при 61—64 °С и сопровождается потерей 3—4 % массы образцов. Несущественно изменяется и температура максимальной скорости разложения: от 353 до 364 °С. Как следует из литературных данных, процесс термической деструкции целлюлозы идет по двум направлениям: деполимеризации и дегидратации. Термическая деполимеризация приводит к образованию левоглюкозана, который дегидратируется и разлагается с образованием низкомолекулярных летучих соединений, и частично полимеризуется с образованием угля. На кривых ДСК вышеперечисленные процессы характеризуются одним эндо- и двумя экзоэффектами. Для исследованных образцов наибольшие различия зафиксированы именно для ДСК-кривых.

Данные рентгенофазового анализа исходных и регенерированных в виде волокон целлюлоз иллюстрируют закономерную аморфизацию целлюлозы в результате растворения и последующего формирования волокна, что было подтверждено и спектроскопически по данным ИК-Фурье спектров.

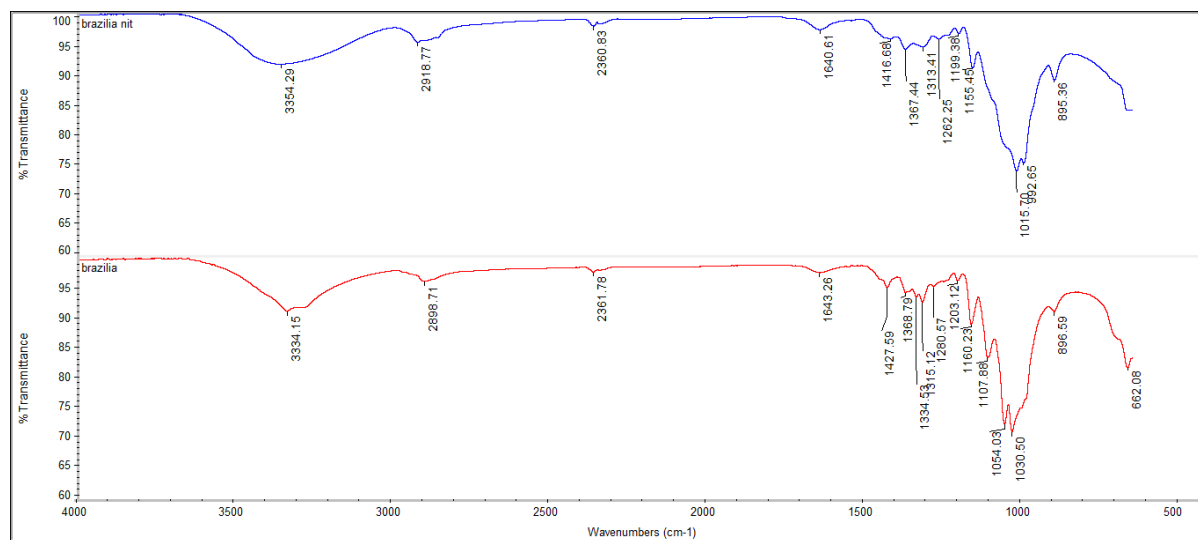


Рис. 1. ИК-Фурье волокна (верхний график) и исходной целлюлозы (нижний график)

1. Гриншпан Д.Д., Гончар А.Н., Савицкая Т.А., Цыганкова Н.Г., Макаревич С.Е. Получение гидратцеллюлозных волокон из растворов целлюлозы в ортофосфорной кислоте // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. – 2014. – Сер. Хім. навук. – № 2. – С. 115–118.
2. Гончар А.Н. Получение прядильных растворов целлюлозы в водных растворах ортофосфорной кислоты [Текст] / А.Н. Гончар, Д.Д. Гриншпан, С.Е. Макаревич, Н.Г. Цыганкова, Е.В. Шеймо // Нефтехимический комплекс. – 2011. – № 1 (6). – с. 6–9.
3. Grinshpan D. Will the cellulose fibre production process become greener? [Text] / D. Grinshpan, T. Savitskaya, N. Tsygankova, S. Makarevich, A. Hanchar // XI International Conference IMTEX'2011.Lodz, Poland. 7 – 8 November, 2011. p. 59–64.
4. Hummel M. [et al.] Ionic Liquids for the Production of Man-Made Cellulosic Fibers: Opportunities and Challenges / M. Hummel [et al.] // Adv. Polym. Sci.– 2016. – Vol. 271. – P.133–168 DOI: 10.1007/12_2015_307
5. Fink H.P. [et al.] Structure formation of regenerated cellulose materials from NMMO-solutions// Prog. Polym. Sci. – 2001. – Vol. 26, N. 9. – P. 1473–1524.
6. Good real word examples of wood-based sustainable chemistry / D. Grinshpan, T. Savitskaya, N. Tsygankova, S. Makarevich, I. Kimlenka, O. Ivashkevich // Sustainable Chemistry and Pharmacy – 2017. – Vol. 5, June. – P. 1–13.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИПОЯ Al-40,0Ge-3,4Si МАС. % ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД35 И КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ Х18Н9

А.А. Иванников, А.В. Абрамов, А.Н. Сучков, М.А. Пенязь,
Д.М. Бачурина, Н.С. Попов, О.Н. Севрюков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия; xxxzx@mail.ru

Внедрение деталей, выполненных из алюминиевых сплавов в классические стальные конструкции обусловлено экономической выгодой и широкой применимостью данных сплавов благодаря таким свойствам алюминия, как: высокая теплопроводность, низкий удельный вес и возможность получения сплавов высокой прочности [1—4]. Технология пайки позволяет получать разнородные неразъёмные соединения, в том числе сталей и алюминиевых сплавов. Соединение алюминиевых сплавов с коррозионностойкой сталью сопровождается образованием хрупких интерметаллических слоёв Fe-Al, толщина которых оказывает большое влияние на прочность данных соединений при испытаниях на разрыв [5, 6]. Для соединения деталей из алюминиевых сплавов используют припой на основе классической системы Al-Si, однако их применение без дополнительного легирования ограничено, что связано с высокой температурой ликвидуса данных сплавов [7]. Легирование германием классической системы позволяет понизить скорость роста реакционного слоя и получить температуру плавления тройного сплава Al-Ge-Si ниже 500 °С, что достигается за счёт образования между алюминием и германием легкоплавкой эвтектики с температурой плавления 420 °С [8—10]. Понижение температуры пайки и уменьшение времени выдержки позволяет контролировать рост интерметаллических слоёв Fe-Al, сохранять требуемую микроструктуру и механические свойства алюминиевых сплавов [6, 11, 12]. Технология быстрой закалки расплава позволяет получить припой системы Al-Ge-Si с любым содержанием германия в виде ленты. Ленточные сплавы-припои с высоким содержанием германия обладают низкой пластичностью и высокой твердостью, что обуславливает трудности при проведении таких технологических процессов, как штамповка и резка при изготовлении закладных элементов под пайку [13]. В связи с этим, необходимо применять термообработку, повышающую технологические характеристики припоев в виде лент.

Цель работы — установление влияния термического воздействия на структуру и технологические характеристики ленты припоя Al-40,0Ge-3,4Si мас. % и описание формирования структурно-фазового состояния соединений из высокопрочного алюминиевого сплава АД35 и коррозионностойкой стали Х18Н9.

Лента сплава Al-40,0Ge-3,4Si, мас. % в исходном состоянии испытывает хрупкое разрушение при минимальной деформации, что резко ограничивает возможность ее применения без термообработки. Определение микротвердости и измерение пластических характеристик лент сплавов показало, что наиболее оптимальной термообработкой лент для повышения пластичности материала является отжиг по режиму 300 °С/10 мин, так как при данной термообработке уже завершены процессы разложения метастабильных фаз и наблюдается минимальный рост фазы на основе Ge. Получены паяные соединения алюминиевого сплава АД35, коррозионностойкой стали Х18Н9 и их разнородное паяное соединение. Установлено, что германий не участвует в формировании паяных соединений, а его содержание влияет только на критические температуры фазовых превращений в припое. Разнородное соединение формируется за счёт образования интерметаллической фазы AlFeSi толщиной 8—10 мкм при пайке по режиму 540 °С/30 мин с использованием припоя Al-40,0Ge-3,4Si, мас. %. Металлографические исследования показали целостность и отсутствие дефектов у всех паяных соединений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта № 21-52-12026.

This research was funded by RFBR and DFG, project number 21-52-12026.

1. Dilthey U., Stein L. Multimaterial car body design: challenge for welding and joining // Sci. Technol. Weld. Join. – 2006. – Vol. 11, № 2. – P. 135–142.
2. Sierra G. et al. Steel to aluminium braze welding by laser process with Al-12Si filler wire // Sci. Technol. Weld. Join. – 2008. – Vol. 13, № 5. – P. 430–437.
3. Chang S.Y. et al. Joining 6061 aluminum alloy with Al-Si-Cu filler metals // J. Alloys Compd. – 2009. – Vol. 488, № 1. – P. 174–180.

4. Fedorov V., Uhlig T., Wagner G. Investigation of fatigue damage in aluminum/stainless steel brazed joints // Weld. World. Welding in the World. – 2018. – Vol. 62, № 3. – P. 609–616.
5. Schubert E. et al. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry // J. Mater. Process. Technol. – 2001. – Vol. 115, № 1. – P. 2–8.
6. Martinsen K., Hu S.J., Carlson B.E. Joining of dissimilar materials // CIRP Ann. Manuf. Technol. – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 679–699.
7. Fedorov V. et al. Microstructural study of Al-Ag-Cu-Si filler metal for brazing high-strength aluminum alloys to stainless steel // Metals (Basel). – 2020. – Vol. 10, № 12. – P. 1–8.
8. Dai W. et al. Torch brazing 3003 aluminum alloy with Zn-Al filler metal // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2012. – Vol. 22, № 1. – P. 30–35.
9. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 томах: Том 3. – М.: Машиностроение. – 2000. – 448 с.
10. Akdeniz M. V., Mekhrabov A.O. The effect of substitutional impurities on the evolution of Fe-Al diffusion layer // Acta Mater. – 1998. – Vol. 46, № 4. – P. 1185–1192.
11. Cheng W.J., Wang C.J. Effect of silicon on the formation of intermetallic phases in aluminide coating on mild steel // Intermetallics. Elsevier Ltd. – 2011. – Vol. 19, № 10. – P. 1455–1460.
12. Roulin M. et al. Strength and structure of furnace-brazed joints between aluminum and stainless steel // Weld. J. – 1999. – Vol. 78, № 5.
13. Schubert T. et al. Preparation and phase transformations of melt-spun Al-Ge-Si brazing foils // J. Mater. Sci. – 1997. – Vol. 32, № 8. – P. 2181–2189.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ

В.Д. Борозна

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

Цель работы — прогнозирование величин циклической формоустойчивости и интенсивности потери формы искусственной кожи (ИК) для верха обуви.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования выбраны ИК различных структур, применяемые в обувной промышленности. Для расчета математических зависимостей воспользуемся принятыми положениями в указанной в работе [1] и получим математическую модель в виде:

$$\Phi_d = \frac{n}{a_0 + a_1 n}, \quad (1)$$

где Φ_d — динамическая формоустойчивость ИК; a_0, a_1 — параметры модели; n — число циклов нагружения, циклы.

параметры модели:

$$a_0 = \frac{n_1}{\Phi_1}, a_1 = \frac{1}{\Phi_{кр}}. \quad (2)$$

где Φ_1 — суммарная высота складок равное при первом фиксированном числе циклов нагружения, мм; $\Phi_{кр}$ — критическое значение суммарной высоты складок, мм; n_1 — первое фиксированное число циклов нагружения ($n = 1000$ циклам).

Параметр a_1 модели имеет размерность $(\%)^{-1}$ и характеризуется предельное изменение остаточного удлинения при проведении усталостных испытаний на многократное нагружение.

Параметр a_0 модели является темповым показателем, определяющий темп нарастания относительного удлинения в материале на начальном этапе циклического нагружения в процессе многократного нагружения.

Для проверки адекватности математической модели проведены исследования динамической формоустойчивости в зависимости от высоты образования складок. Испытания проводятся со скоростью изгиба образца 102 цикла в минуту, значения показателей определяют после 1 тыс., 2 тыс., 3 тыс., 4 тыс., 5 тыс., 10 тыс., 20 тыс., 50 тыс., 100 тыс. и 150 тыс. циклов изгиба. Количество циклов было выбрано из тех соображений, что человек в среднем совершает 5000–6000 шагов в сутки. Установлено, что в течение 14 суток обувь приформовывается к стопе, то есть образуются устойчивые складки на поверхности кожи в средней части союзки обуви [2].

Измерение высоты складок проводили с помощью чертежно-графического редактора системы трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D. Для определения коэффициента складкообразования отсканированные образцы загружали в программное обеспечение и определяли высоту складок.

Результаты и их обсуждение. На основании результатов экспериментальных исследований произведена численная оценка параметров эмпирической математической модели (1) для пяти ИК в продольном направлении: «Однослойная ИК коричневая, арт. M1042-36», «Однослойная ИК серая, арт. M1042-26», «Двухслойная ИК арт. Hongxin 11022-16», «Met lack т-синий» и «Эко-кожа». В табл. 1 приведены результаты расчета

параметров модели (1) для исследуемых ИК. Параметры модели определяли методом наименьших квадратов с помощью программы «Maple».

Таблица 1. Параметры математической модели (4.1) взаимосвязи циклической формоустойчивости и количества циклов нагружения

Наименование ИК	Параметры математической модели (4.14)		Величина достоверности модели R^2
	a_0	a_1	
Однослойная ИК коричневая, арт. M1042-36	389,93	0,29	0,88
Однослойная ИК серая, арт. M1042-26	160,32	0,22	0,88
Двухслойная ИК арт. Hongxin 11022-16	81,57	0,09	0,94
Met lack т-синий	167,74	0,15	0,94
Эко-кожа	167,78	0,16	0,80

Проверка адекватности моделей производилась с помощью критерия Фишера при уровне значимости 5 %:

- для «Однослойной ИК коричневая, арт. M1042-36» $F_{\text{расч.}} = 1,06$, $F_{\text{табл.}} = 2,4$;
- для «Однослойной ИК серая, арт. M1042-26» $F_{\text{расч.}} = 1,07$, $F_{\text{табл.}} = 2,4$;
- для «Двухслойная ИК арт. Hongxin 11022-16» $F_{\text{расч.}} = 1,06$, $F_{\text{табл.}} = 2,4$;
- для «Metlack т-синий» $F_{\text{расч.}} = 1,06$, $F_{\text{табл.}} = 2,4$;
- для «Эко-кожа» $F_{\text{расч.}} = 1,11$, $F_{\text{табл.}} = 2,4$.

Для всех моделей наблюдаемое значение критерия Фишера меньше критического, что указывает на адекватность математической модели результатам эксперимента с доверительной вероятностью 0,95. На рис. 1 представлены зависимости величины циклической формоустойчивости от длительности нагружения, полученные экспериментальным путем.

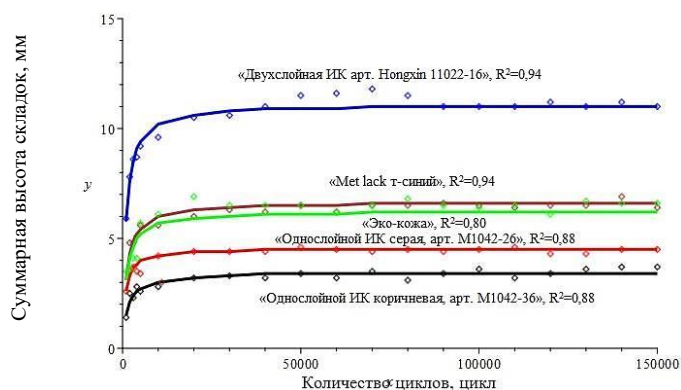


Рис. 1. Зависимость циклической формоустойчивости от числа циклов нагружения проб

В результате проведенных исследований показана возможность прогнозирования циклической формоустойчивости ИК по результатам кратковременных испытаний. В зависимости от структуры ИК необходимо различное количество циклов нагружения. Для ИК, имеющих замшеподобную структуру, достаточно определять циклическую формоустойчивость при 5 тыс. циклов. На ИК с лицевой поверхностью (2-хслойные) постоянное количество складок образуется при 10 тыс. циклов.

1. Кузнецов А.А., Ольшанский В.И. Оценка и прогнозирование механических свойств текстильных нитей. – Витебск: УО «ВГТУ». - 2004
2. Зыбин Ю.П. Конструирование изделий из кожи. – М.: Легкая и пищевая промышленность. – 1982

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПОЛИМЕРА МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА-АКРИЛОНИТРИЛ-БУТАДИЕН-СТИРОЛА, ОБРАБОТАННОГО В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ

Д.В. Брель, А.П. Сазанков

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
brel.dmitriy@mail.ru

Введение. В настоящее время модификация поверхностей полимерных материалов неравновесной плазмой газовых разрядов широко используется не только для решения различных научных проблем, но и для решения многих конкретных технологических и производственных задач. Привлекательность плазмохимических технологий связана с тем, что в отличие от традиционных химико-технологических процессов плазменные процессы являются более экологически чистыми и менее энергозатратными, более того, ряд задач возможно решить только с использованием плазмохимических технологий. Плазмохимические методы позволяют эффективно формировать слои на основе полимеров с уникальными физико-химическими свойствами [1].

Для анализа материала была выбрана инфракрасная (ИК) спектроскопия так как она является одним из наиболее точных методов анализа веществ, находящихся в газообразном, жидком и твердом фазовом состоянии [2].

Цель работы — исследование характера влияния плазмохимической обработки (ПХО) на структурные свойства сополимера метилметакрилата-акрилонитрил-бутадиен-стирола (МABS) методом ИК-спектроскопии.

Материалы и методы исследования. В качестве экспериментального материала была выбрана лента МABS (Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Беларусь) толщиной 0,3—0,5 мм. ПХО проводили в низкотемпературной плазме тлеющего разряда в среде остаточных газов на опытно-промышленной установке [3]. Режимы обработки: давление остаточных газов $P_{\text{ост}}$ — 19—21 Па, напряжение на генераторе $U_{\text{ген}}$ — 160 В, время обработки $t_{\text{обр}}$ — 10 и 20 с соответственно. Использован генератор плазмы с частотой $f_{\text{пл}} = 32$ кГц.

Определение качественного и количественного состава производилось при помощи ИК-спектра полученного на спектрометре NICOLET 5700 FT-IR.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены ИК-спектры исследуемого сополимера при различных временах обработки.

В области $3100—3600\text{ см}^{-1}$ наблюдается изменения содержания гидроксильных групп [4]. Можно сделать вывод о том, что снижение интенсивности полос в области О-Н групп свидетельствует о сстраивании загрязнений и жидкости при ПХО.

В области волновых чисел $1500—500\text{ см}^{-1}$ наблюдается количественное изменение состава сополимера МABS, в данной области наблюдаются валентные колебания простых связей между атомами различных элементов и деформационных колебаний простых связей. Спектр в данной области индивидуален для каждой молекулы в связи с чем данная область ИК-спектра не рассматривалась при оценке состава сополимера МABS [2].

Заключение. Исходя из полученных результатов можно утверждать, что ПХО оказала незначительное влияние на структурные свойства сополимера МABS, однако может быть полезна как промежуточная операция при дальнейшем использовании материала.

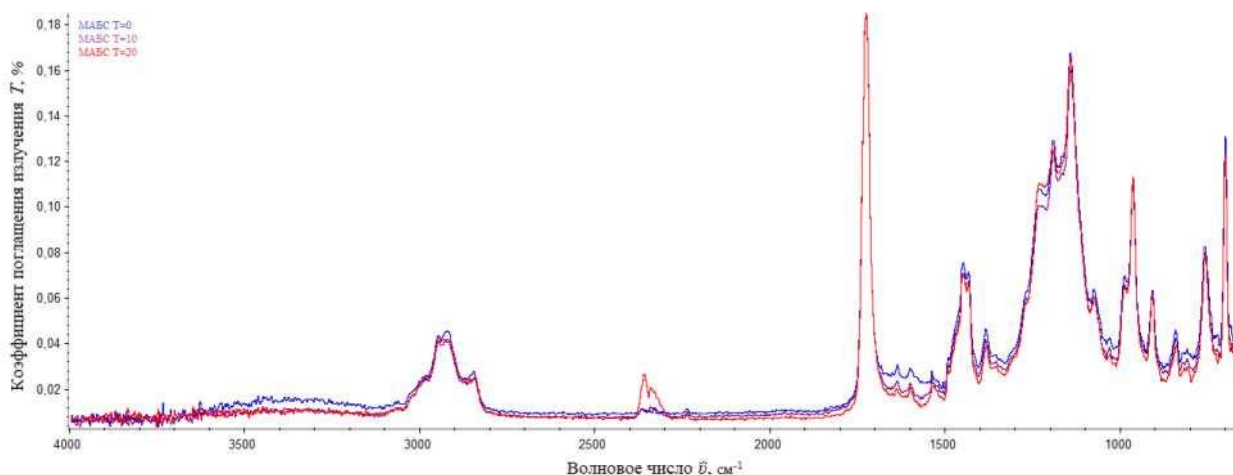


Рис. 1. ИК-спектр поглощения метилметакрилата-акрилонитрил-бутадиена-стирола (МABS)

Благодарности. Автор выражает благодарность канд. техн. наук Шелестовой В.А., канд. техн. наук Макаренко О.А., и мл. науч. сотр. Калинину Л.А. за помощь в проведении исследований и обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии 4.2.2.».

1. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. М.: Мир, 1988, 376 с.
2. Богданович, П.Н. Современные методы анализа материалов: учеб. пособие / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 145 с.
3. Гракович П.Н., Толстомятов Е.М., Иванов Л.Ф., Шелестова В.А., Макаренко В.М., Стратанович В.А. Установка для плазмохимической обработки углеродных тканей. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. XVI Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ: сборник трудов, 13–17 сентября 2021 г., Иваново, Россия. Иваново, 2021. С. 101
4. Саркисов О.А., Михалко А.М., Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Гракович П.Н., Рогачев А.А. Морфологические, физико-химические особенности многократной обработки пленок полиэтилена в плазме барьерного разряда // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2021. № 1 (84). С. 42–52.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И ПОЛИАМИДА 66 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

А.С. Брундуков, И.С. Шилько

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
alexeybrundukov@gmail.com

Введение. Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) является суперконструкционным полимером [1], обладает высокими показателями теплостойкости, ударной вязкости, повышенной твёрдостью и высоким уровнем износостойкости [2, 3]. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе ПЭЭК являются перспективными для применения в тяжело нагруженных узлах компрессорного оборудования, например в клапанах, пластины для которых изготавливают из стеклопластиков, в частности, из стеклонаполненных полиамидов (ПА).

Исследование упругих свойств ненаполненного и стеклонаполненного ПЭЭК, полученного высокопроизводительным методом экструзии, направлено на получение представления о механизме влияния анизотропии механических свойств материала на эксплуатационные характеристики пластин клапанов компрессоров.

Цель работы — оценка анизотропии и определение модуля Юнга ПЭЭК и ПА66, полученных методом экструзии.

Материалы и методы исследования. Для исследований выбраны материалы ПЭЭК ненаполненный (JUNHUA, PEEK 5600G) и 30 % стеклонаполненного (Roehling, SustaPEEK GF30). Также был исследован 30 % стеклонаполненный ПА66 (Ensinger, TECAMID 66 GF30). Определение значений модуля Юнга при сжатии проводилось по ГОСТ 4651–2014 на испытательной машине Instron 5567.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлена кривая зависимости напряжение-деформация для ненаполненного ПЭЭК, полученного методом экструзии.

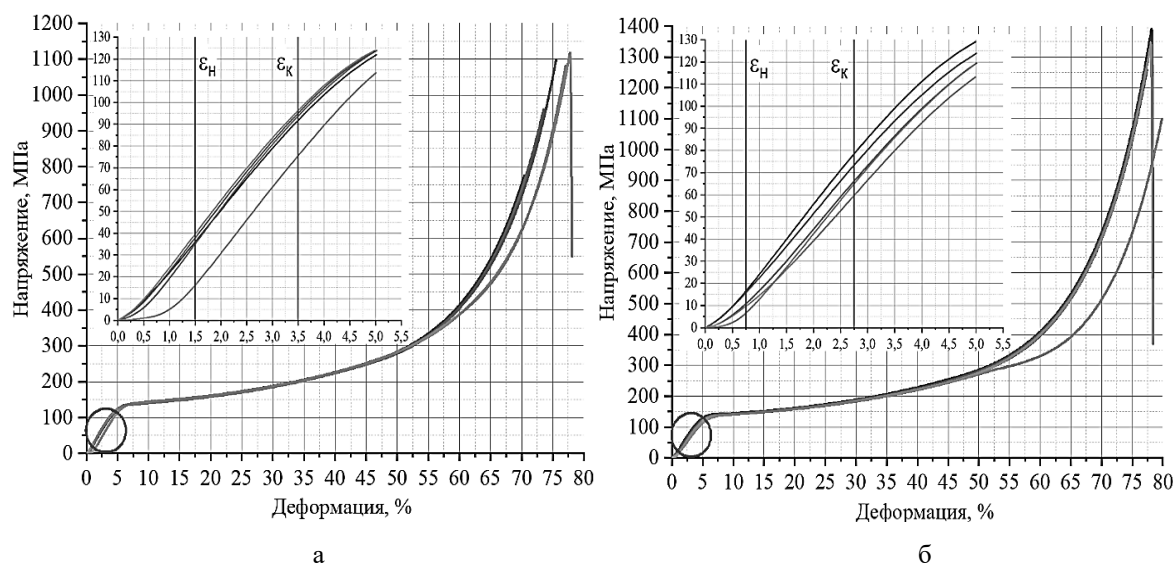


Рис. 1. Зависимость напряжений от деформаций ненаполненного ПЭЭК при сжатии
в направлении: а — вдоль экструзии; б — поперёк экструзии

Для определения модуля Юнга рассмотрим начальный участок кривой, на котором увеличение напряжений пропорционально росту деформаций. Расчёт модуля проводился для каждого из образцов по формуле:

$$E = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\varepsilon_k - \varepsilon_n} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где: σ_n , σ_k — напряжения, соответствующие начальному и конечному значению напряжения для выбранного интервала зоны пропорциональности, МПа; ε_n , ε_k — деформации, соответствующие начальному и конечному значению деформации для выбранного интервала зоны пропорциональности.

Аналогичным путём установлены значения модуля упругости для направлений вдоль Ев и поперёк Еп процесса экструзии для 30 % стеклонаполненных ПЭЭК и ПА66.

Степень анизотропии A представляет собой отношение большего значения модуля Юнга к меньшему.

Результаты определения степени анизотропии и модуля Юнга при сжатии представлены в табл. 1.

Таблица 1. Модуль Юнга ПЭЭК и ПА66

Материал Направление	PEEK 5600G	SustaPEEK GF30	TECAMID 66 GF30
$E_{\text{ев}}$, ГПа	2,47	3,99	3,07
$E_{\text{еп}}$, ГПа	2,85	3,66	3,15
A	1,15	1,09	1,03

Степень анизотропии для ненаполненного ПЭЭК и 30 % стеклонаполненных ПЭЭК и ПА составили 1,15, 1,09 и 1,03 соответственно. Малые различия между Ев и Еп характеризуют материалы как изотропные с точки зрения упругих характеристик.

Заключение. Ненаполненный ПЭЭК уступает стеклонаполненным ПЭЭК и ПА по степени анизотропии свойств и является наименее жёстким. Наполнение 30 % стекловолокном привело к увеличению модуля упругости при сжатии в среднем на 44 %.

Степени анизотропии стеклонаполненного ПЭЭК и ПА отличаются друг от друга несущественно, однако, для ПЭЭК композита характерна более высокая жесткость, что является важной характеристикой для пластин клапанов.

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. Саламов А.Х. Полиэфиркетоны: свойства и применение / Саламов А.Х., Микитаев А.К., Беев А.А. // Современные тенденции развития науки и технологий – 2015. – № 8–3 – С.21–25.
3. Конгапшев А.А. Структура, синтез, свойства, применение полиэфирэфиркетонов / Конгапшев А.А., Бажева Р.Ч., Хараев А.М. // Современные проблемы естествознания – 2020. – С.33–41.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫМИ ФИЛЬТРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА

В.Ю. Гарбарук

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

Введение. Очистка потока от жидкостного загрязнения является одной из ключевых задач, возникающих в процессе подготовки промышленных газовых сред. В зависимости от характера и назначения газовой среды, в потоке могут присутствовать конденсаты углеводородов, воды, а также другие жидкости в виде капельно-аэрозольной фазы дисперсностью от десятых долей до нескольких микрометров.

Эффективным методом отделения данных веществ от потока газа является использование фильтрующих материалов на основе микроволокон различной природы

Цель работы — изучение характера насыщения жидкостью коалесцентно-фильтрующего слоя фильтрующих элементов, выполненных из полифениленсульфидных микроволокон и дополнительных различными функциональными слоями.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили на стенде испытания газовых фильтров [1], оснащённым лазерным оптическим датчиком частиц. В качестве системы генерации жидкостного загрязнения было использовано сопло Ласкина для распыления диоктилтерефталата (ДОТФ), позволяющие вводить в поток аэрозоль размером от 0,2 до 5 мкм.

Были изготовлены 4 типа фильтрующих элементов для испытаний. Образцы представляют собой цилиндрические

фильтроэлементы, состоящие из двух слоев полифениленсульфидных волокон, полученных по технологии «melt blown» между которыми расположены коалесцентно-фильтрующий слой и слои функциональных нетканых материалов.

В образце № 1 был применен только коалесцентный слой композитной боросиликатной стекlobумаги класса Н13 (ГОСТ Р ЕН 1822-1–2010), в образце № 2 слой стекlobумаги Н13 и слой полиэфирного материала класса М5 (ГОСТ Р ЕН 779–2014) поверхностной плотностью 170 г/м²; образец № 3 состоял из стекlobумаги, волокнисто-пористого фторопласта «Грифтекс» и полиэфирного материала класса М5 поверхностной плотностью 170 г/м²; в образце № 4 были использованы стекlobумага и полиэфирный материал с гидрофобной пропиткой PES 450 OGF поверхностной плотностью 450 г/м².

Перед подачей в воздушный поток аэрозоля были измерены массы образцов и перепады давления на сухих фильтрующих элементах при различных расходах среды. Все образцы характеризуются схожими величинами аэродинамического сопротивления и близкой к линейной зависимости перепаду давления от скорости потока в измеряемом диапазоне расходов 4–25 см/с.

После этого был выбран расход, соответствующий скорости на среднем слое фильтрующего элемента 16 см/с. Содержание аэрозоля ДОТФ во входном потоке составляло 40–45 мг/м³. Были определены значения абсолютной тонкости фильтрации и массовой эффективности удаления жидкости. Далее каждые 10 минут фиксировалось изменение перепада давления. По прошествии 3 часов была повторно замерена концентрация загрязнения в потоке до и после фильтрующего элемента и определена эффективность очистки. После испытаний образцы были повторно взвешены, прирост массы на всех образцах составил $2,0 \pm 0,1$ г.

Результаты и их обсуждение. Все фильтроэлементы показали близкие значения эффективности очистки по массе на несмоченных образцах (99,90–99,98 %) с абсолютной тонкостью фильтрации 2,5 мкм.

По истечению 3 часов эффективность очистки образцов снизилась в пределах нескольких сотых процента, что связано с вторичным уносом жидкости с поверхности еще не вышедшего на рабочий режим фильтроэлемента. Основным загрязнением в выходном потоке были частицы ДОТФ субмикронного размера.

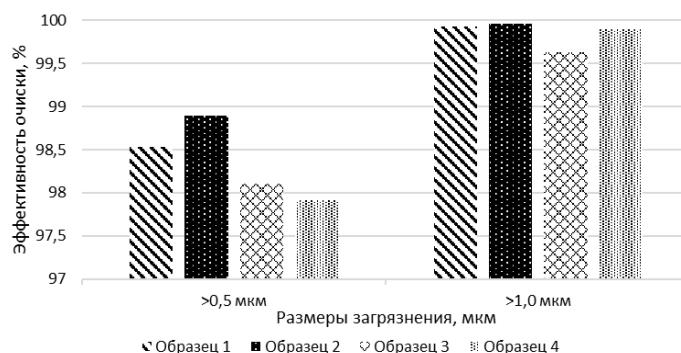


Рис. 1. Эффективности очистки исследуемых фильтрующих элементов после 3 часов работы

На рис. 1 представлено сравнение эффективности, из которого следует, что фильтрующая способность для частиц более 1 мкм у всех образцов схожа и определяется в основном стекlobумагой, различия для аэрозоля субмикронного размера связаны с процессами коалесценции и стекания жидкости, проходящими в применяемых дренажных материалах.

Насыщение жидкостью стекlobумаги оценивали по изменению перепада давления (Рис. 2). Наиболее эффективный отвод жидкости из коалесцентного слоя и более высокую эффективность очистки обеспечивает применение стекlobумаги в сочетании с полиэфирным материалом М5.

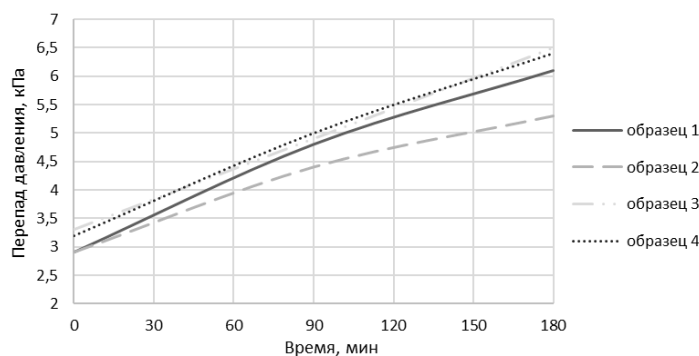


Рис. 2. График изменения величины перепада давления на образцах при их насыщении ДОТФ

Заключение. Таким образом использование тонковолокнистых стеклянных слоев в комбинации с полимерными волокнисто-пористыми материалами позволяет осуществить высокоэффективную очистку газового потока от жидкостного загрязнения, а выбор оптимального дренажного слоя позволяет регулировать насыщение коалесцентного слоя и величину перепада давления фильтрующих элементов.

1. Гарбарук, В.Ю. Методика определения эффективности фильтрующих элементов для очистки газов от масляного тумана / В.Ю. Гарбарук. – Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования, VI Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых, посвященная памяти члена-корреспондента НАН Беларуси С.С. Песецкого, 2020. – С. 88–89.

СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЛИТИЕВОЙ И КАЛЬЦИЕВОЙ ОСНОВЕ

Ф.А. Григорьев

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
grigoriev.feodor@gmail.com

Введение. Электроконтактные смазочные материалы представляют собой класс специальных пластичных смазок, служащих для предотвращения залипания электрических контактов, защиты от воздействия факторов окружающей среды, повышения стабильности протекания электрического тока, а также для улучшения триботехнических показателей скользящих электрических соединений [1]. Оптимальный выбор электроконтактных смазочных материалов, как и других типов смазок, напрямую зависит от условий, при которых тот или иной смазочный материал будет использоваться. В связи с этим возникает необходимость определения граничных характеристик разработанных смазочных материалов для электрических контактов.

Цель работы — определение граничных условий эксплуатации разработанных электроконтактных смазочных материалов и сравнение их функциональных характеристик.

Материалы и методы исследования. В качестве исследуемых смазочных материалов использовали разработанные в ИММС НАН Беларуси электроконтактные смазочные материалы СК-1 и СК-2. Первый из них, представляет собой литиевую смазку ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267–74) с введенным в нее металлизированным медью графитом и коллоидным графитом. Второй — кальциевую комплексную смазку КПСМ-2М, с тем же пакетом функциональных добавок. Исследование электрофизических характеристик производили по специально разработанной методике ПМИ 080-2022, основанной на ГОСТ 6581–75 с использованием тераомметра и измерительной ячейки [2]. Температура каплепадения оценивалась по ГОСТ 6793–74. Величину пенетрации определяли по ГОСТ 2137–2013. Коллоидная стабильность исследовалась на приборе ЛИНТЕЛ АКС-20 по ГОСТ 7142–74. Предел прочности на сдвиг пластичных смазочных материалов оценивался на приборе ЛИНТЕЛ СК-20 по ГОСТ 7143–73. Показатель износа определялся на приборе ЧШМ-К1 по ГОСТ 9490–75.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследований электрофизических характеристик смазочных материалов представлены на рис. 1.

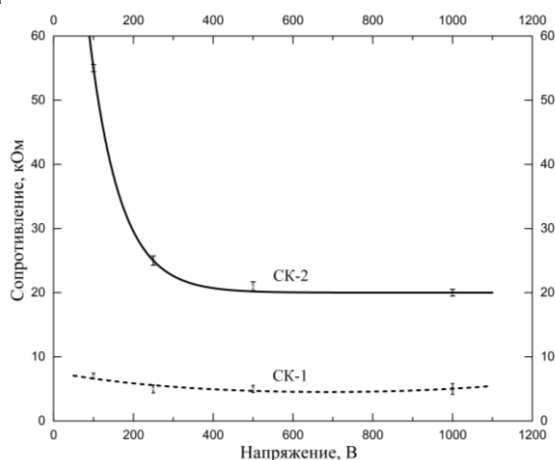


Рис. 1. График зависимости электрического сопротивления от напряжения на контактах при величине зазора между электродами измерительной ячейки 0,5 мм.

Как видно из графика на рис. 1, при постоянной величине контактного зазора 0,5 мм между электродами ячейки, электрическое сопротивление смазки СК-2 в 1,5—2 раза выше, чем у смазки СК-1 при тех же

условиях. Связано это с повышенными физико-механическими характеристиками базовой смазки КПСМ-2М, в частности, высоким показателем предела прочности на сдвиг (табл. 1), который коррелирует с повышенным значением вязкости, при котором под действием ЭДС частицы металлизированного графита не выстраиваются в цепочки, способствующих протеканию электрического тока.

Таблица 1. Физико-механические и триботехнические характеристики смазочных материалов

Смазка	Физико-механические и триботехнические характеристики				
	Показатель износа, мм	Температура каплепадения, °С	Пенетрация, мм·10 ⁻¹	Коллоидная стабильность, %	Предел прочности на сдвиг, Па
ЦИАТИМ-201	1,07	175	325	26	250
КПСМ-2М	0,61	247	362	8,64	453
СК-1	0,75	201	339	26	232
СК-2	0,73	171	319	8,44	730

Улучшение показателя износа для смазки СК-1 по сравнению со смазкой ЦИАТИМ-201 более чем 1,4 раза объясняется защитным действием введенного коллоидного графита. Повышение показателя износа СК-2 по сравнению с КПСМ-2М незначительно и находится в пределах инструментальной ошибки. Рост температуры каплепадения для СК-1 и ее уменьшение для СК-2 в сравнении скорее всего объясняется отличиями межфазного взаимодействия частиц металлизированного графита с их базовыми смазками.

Известно, что высокая температура и механическое воздействие на смазочные материалы при введении добавок, изменяет среднее отношение длины к диаметру волокон дисперсной фазы, что приводит к изменению их предела прочности на сдвиг [3]. Очевидно, что для смазки на основе кальциевого комплексного мыла этот эффект проявляется в большей степени, что приводит к повышению почти в 1,7 раза предела прочности, по сравнению с базовым материалом. Для СК-1 те же воздействия эффекта практически не оказали.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют, что изменение физико-механических характеристик исследованных электроконтактных смазок при введении в них одинаковых дисперсных наполнителей связано с особенностями межмолекулярного взаимодействия дисперсной фазы и их дисперсионной среды.

Сделан вывод, что смазку СК-1 из-за сравнительно низких физико-механических характеристик целесообразно использовать для мало- и средненагруженных скользящих электрических контактов при максимальной величине зазора до 0,5 мм. Электроконтактную смазку СК-2 предлагается применять для средне- и высоконагруженных электрических контактов, при величине контактного зазора не превышающем 0,1—0,25 мм.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект БРФФИ T21ЭТ-018).

1. Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. Электрические контакты: Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект» – 2008 – 560 с.
2. Григорьев Ф.А., Ковалёва И.Н., Марченко Л.Н., Подгорная В.В. Статистический анализ процессов электроконтактного взаимодействия металлов в среде электропроводной смазки // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. ПОЛИКОМТРИБ-2022, ИММС НАН Беларуси, Гомель, 2022. – Гомель: ИММС НАН Беларуси. – 2022 – 176 с.
3. И.Г. Фукс. Пластичные смазки – М.: Химия. – 1972 – 160 с.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ

Е.И. Ивашко

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь; ivashkokatrinka@mail.ru

Введение. Паропроницаемость материалов играет важную роль для создания благоприятных условий и нормального функционирования организма человека. Стандартные методики, используемые для оценки паропроницаемости материалов, существенно различаются по условиям, создаваемым в процессе эксперимента.

Цель работы — анализ требований стандартных методов исследования паропроницаемости материалов лёгкой промышленности, для выявления их недочётов и отсутствия практической пользы от полученных результатов.

Процесс прохождения влаги через материал — сложный многоступенчатый процесс. Проникновение пара через материал обусловлено процессами диффузии вследствие разности давлений пара в атмосферной среде и подождежном пространстве и сорбции-десорбции, а также конвективными и другими процессами, вызывающими движение воздуха у поверхности материала. Соотношение количества пара, проходящего через материал различными путями в условиях относительно спокойного воздуха, зависит от пористости и сорбционной способности материала [1].

Авторами [2] было выделенно несколько групп методов определения паропроницаемости в зависимости от условий проведения испытаний. Это методы, в которых применяется перепад температур по сторонам образца; методы, не предусматривающие создание температурного градиента; методы, в которых исследования проводятся при неподвижном наружном воздухе; методы, в которых создается заданная скорость движения наружного воздуха.

Среди большого числа методик, применяемых для оценки способности материалов пропускать пары воды, до сих пор не найдена такая, которая была бы признана мировым сообществом ученых в качестве универсальной или рекомендуемой для исследования способности водозащитных материалов пропускать пары воды, сохраняя при этом высокий уровень водонепроницаемости. Обзор существующих методов определения паропроницаемости материалов позволяет выделить основные показатели, определяемые для оценки этого свойства: коэффициент паропроницаемости (скорость передачи водяного пара), относительная паропроницаемость, сопротивление проникновению паров воды.

Анализ стандартных методов [3—8] исследования паропроницаемости материалов легкой промышленности показал, что для каждого из рассмотренных методов в качестве оценки уровня паропроницаемости служит количество паров воды, прошедших через единицу площади образца за единицу времени, в отдельных случаях [3, 4, 8] представлена и относительная оценка. В остальном методы индивидуальны и предусматривают использование разной аппаратуры при разных условиях и длительности проведения испытаний. Отсутствие единства не позволяет сравнивать значения показателя паропроницаемости разных материалов между собой.

Паропроницаемость трудно описать с помощью фиксированной величины, поскольку процесс переноса водяного пара из пространства под одеждой в окружающую среду нестабилен во времени. Кинетика его сложна и определяется множеством взаимозависимых факторов. На проницаемость материалов для влаги значительное влияние оказывают разность температур между внутренней и внешней поверхностями изделия, скорость движения наружного воздуха. Таким образом, одним из недостатков рассмотренных методов [3—8] является отсутствие условий, приближенных к эксплуатационным. Согласно требованиям стандартных методик к условиям проведения испытаний по определению паропроницаемости температура воздуха снаружи испытательной конструкции изменяется в диапазоне свыше 20 °С. Реальный диапазон условий носки водонепроницаемой одежды значительно шире: он начинается при более низких температурах. Для территории Республики Беларусь среднесезонные температуры составляют от (–3) °С до (+8) °С [9].

Известно, что скорость движения воздуха оказывает значительное влияние на микроклимат в пододёжном пространстве. Исследования, проводившиеся Б.Б. Койранским, Ю.В. Вадковской, В.И. Кузьминой [10,11] и другими авторами, показывают, что при действии ветра теплотери организма человека возрастают по сравнению с безветренной погодой. Особенно быстро охлаждается организм человека при совместном действии ветра и влаги. Воздействие равномерного, медленного и постоянного потока воздуха над наружными поверхностями образцов создаётся лишь при определении показателя паропроницаемости по методу, описанному в [8].

Получить представление о том, сколько водяного пара в единицу времени через единицу площади способен транспортировать материал и сделать соответствующие выводы о соответствии материала назначению можно исследуя показатель паропроницаемости в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Заключение. В результате анализа требований стандартных методов определения паропроницаемости можно сделать следующие выводы:

- различие условий, создаваемых в процессе испытаний не позволяет сравнивать между собой полученные значения паропроницаемости;
- требования к температуре воздуха при проведении испытаний не соответствует тем диапазонам, в которых используются готовые изделия из исследуемых материалов;
- стандартные методики не позволяют воссоздать условий близких к эксплуатационным и варьировать их.

1. Курмашева, Д. М. Адсорбция и процессы переноса молекул воды в пористых и мелкодисперсных средах : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Д. М. Курмашева. – Москва, 2015. – 112 с.
2. Перепелкин, К. Е. Методы исследования свойств текстильных изделий : учеб. пособие / К. Е. Перепелкин, М. Н. Иванов, А. В. Куличенко, С. А. Савина. – Ленинград : ЛИТЛП им. С. М. Кирова, 1988. – 69 с.
3. Кожа. Метод определения паропроницаемости: ГОСТ 938.17-70. – Введ. 01.07.1971. – М. : Госстандарт, 1971. – 3 с.
4. Полотна и изделия трикотажные. Метод определения паропроницаемости и влагопоглощения: ГОСТ 30568-98. – Введ. 01.01.1999. – М. : МГС, 1999. – 10 с.
5. Кожа искусственная и пленочные материалы. Методы определения паропроницаемости и влагопоглощения: ГОСТ 22900-78. – Введ. 01.01.1979. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 14с.
6. Материалы листовые гравиметрический метод определения паропроницаемости: ГОСТ 21472-81. – Введ. 01.08.1981. – М. : Стандартинформ, 2008. – 7 с.
7. Ткани с резиновым покрытием. Определение паропроницаемости летучих жидкостей (гравиметрический метод): ГОСТ 29060-91 (ИСО 6179-89). – Введ. 01.01.2001. – М. : Издательство стандартов, 2004. – 5 с.

8. Ткани с резиновым или полимерным покрытием для водонепроницаемой одежды. Технические условия: ГОСТ Р 57514-2017. – Введ. 01.04.2018. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2017. – 24 с.
 9. Болотко, Л. М. Динамические климатические нормы метеопараметров для г. Минска / Л. М. Болотко, А. М. Людчик, С. Д. Умрейко // Природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 5–14.
 10. Полиевский, С. А. Гигиена спортивной одежды и снаряжения / С. А. Полиевский. – М. : Физкультура и спорт, 1987. – 111 с.
 11. Лаптев, А. П. Гигиена : учебник / А. П. Лаптев, С. А. Полиевский. – М. : Физкультура и спорт, 1990. – 267 с.
-

ТЕМПЕРАТУРНО-БАРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

В.В. Киселевич

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
valentinkis@list.ru

Введение. Развитие теплового пробоя в непроводящей жидкости сопровождается образованием центров испарения, локализованных около растворённых в её объёме газовых пузырьков. Непосредственно пробой наступает, когда количество теплоты, выделяющееся в данных центрах, превышает количество отводимой от жидкости теплоты. При температурах, близких к температуре кипения жидкости, интенсивность газообразования резко усиливается. Поэтому повышение температуры либо снижение давления недегазированных жидкостей при заданной длительности воздействия напряжения приводит к существенному снижению их электрической прочности. Указанная взаимосвязь между механизмами процессов кипения и пробоя жидких диэлектриков допускает возможность применения феноменологического подхода фазовых переходов для описания температурно-барической зависимости пробивного напряжения таких веществ.

Результаты и их обсуждение. В рамках принятого подхода диэлектрическую жидкость, подвергнутую воздействию сильного электрического поля, представим как термодинамическую систему, состояние которой определяется температурой T , давлением p и напряжением пробоя U_{br} . Тогда выражение для свободной энергии Φ жидкого диэлектрика как функции этих параметров вблизи характеристической температуры T_{br} теплового пробоя запишем в виде:

$$\Phi(U_{br}, p, T) = \Phi_0 + a_{pT} U_{br}^2 + b_p U_{br}^6, \quad (1)$$

где Φ_0 — регулярная составляющая энергии, Дж; a_{pT} , Дж/В², и b_p , Дж/В⁶, — параметры, определяющие температурную и барическую зависимости пробивного напряжения. Температуру T_{br} будем отождествлять с температурой кипения жидкости при данном давлении. Полагая, что в окрестности T_{br} справедливо разложение $a_{pT} = a_p (T - T_{br})$, из условия минимума функции (1) получим соотношения для оценки напряжения пробоя жидкости:

$$U_{br} = \left[a_p (T_{br} - T) / 3b_p \right]^{1/4}, \quad T < T_{br}; \\ U_{br} = 0, \quad T \geq T_{br}. \quad (2)$$

Предположение линейной связи между барической константой $A_p = a_p / 3b_p$ и давлением p диэлектрической жидкости позволяет представить уравнение напряжения пробоя для температурной области $T < T_{br}$ в виде:

$$U_{br} = \left[(a_0 + a_1 p) \cdot (T_{br} - T) \right]^{1/4}, \quad (3)$$

где a_0 , В⁴/К, и a_1 , В⁴/(Па·К), — константы, определяемые физико-химической природой диэлектрической жидкости. По литературным экспериментальным данным нами выполнена оценка параметров a_0 и a_1 для недегазированного технического ксилола, применяемого при производстве электроизоляционных лаков. При давлениях ниже атмосферного получены значения $a_0 = 1400$ В⁴/К и $a_1 = 50$ В⁴/(кПа·К); величина пробивного напряжения, найденная из уравнения (3) при температуре 307 К и давлении 20 кПа, составила 19,32 кВ, что хорошо согласуется с экспериментальным значением U_{br} , равным 19,54 кВ.

X-RAY STUDY OF MIXED MACROMOLECULAR CU (II) COMPLEXES WITH ACRYLAMIDE AND SODIUM ACRYLATE COPOLYMER AND GLYCINE

D.L. Kudryavsky, E.K. Fomina, and L.S. Ivashkevich

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

Introduction. X-ray powder diffraction is widely used for complex identification and characterization. In particular, mixed complexes can be characterized by X-ray diffraction [1]. Formation of macromolecular complexes of amorphous polymers with transition metals can be also detected on X-ray diffractogram as changes in 2θ value and intensity of amorphous halo maximums [2]. This work is aimed at evaluating the possibility of crystallization of mixed macromolecular Cu(II) complexes with acrylamide and sodium acrylate that were previously confirmed to form in aqueous solutions.

Materials and methods of investigation. Diffractograms were recorded using Empyrean diffractometer (Malvern Panalytical, Netherlands) with $\text{CuK}\alpha$ radiation and Ni filter. PDF-2 database was used for crystalline phase identification.

Results and discuss. X-ray diffractograms of Cu(II) acetate and glycine were recorded. Those diffractograms correspond to pure individual crystalline compounds. Formation of Cu(II) complexes with glycine in aqueous solution (pH 5) was confirmed. Diffractogram of powder obtained by drying said solution corresponds to crystalline copper bisglycinate where both functional groups of amino acid are ligands. However, several low intensity reflections of Cu(II) acetate were also detected. X-ray diffractogram of acrylamide and sodium acrylate copolymer only contains an amorphous halo (Fig. 1 a), corresponding to non-stereoregular amorphous copolymer. Only one low intensity reflection of Cu(II) acetate is detected on diffractogram of powder obtained by drying a solution (pH 5) containing Cu(II) acetate and copolymer (Fig. 1 b), meaning most of Cu(II) ions are incorporated into amorphous macromolecular complex. Maximum of amorphous halo is also shifted to higher 2θ values, which, according to [2], confirms complex formation.

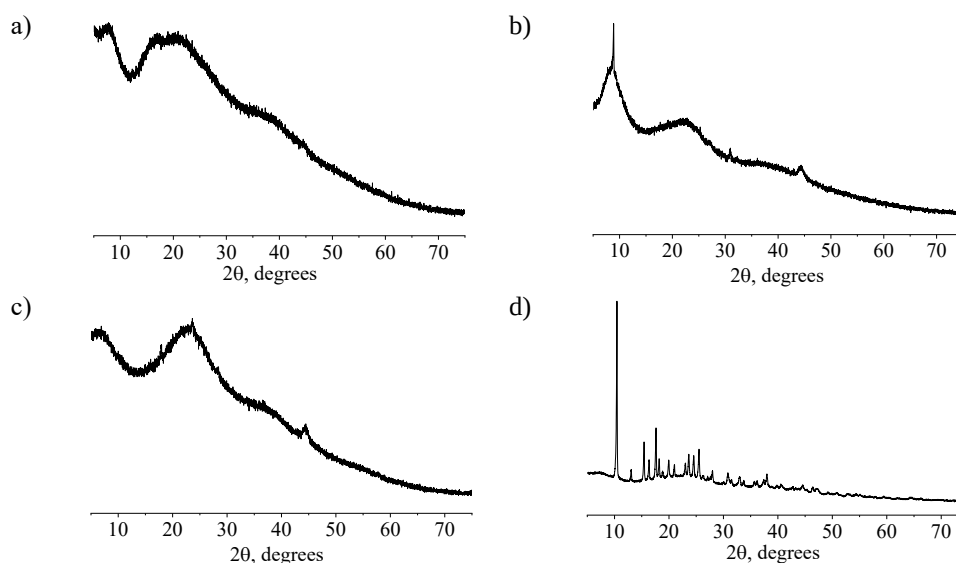


Fig. 1. Powder X-ray diffractograms of acrylamide and sodium acrylate copolymer (a), acrylamide and sodium acrylate copolymer with Cu(II) (b), acrylamide and sodium acrylate copolymer with glycine (c), acrylamide and sodium acrylate copolymer with glycine and Cu(II) (d)

Crystalline glycine reflections are not detected on diffractogram of powder obtained by drying a solution containing both acrylamide and sodium acrylate copolymer and glycine (Fig. 1 c). It can be explained by chaotic distribution of glycine molecules inside the amorphous polymer matrix. Meanwhile X-ray diffractogram of powder obtained by drying a solution containing Cu(II) ions, acrylamide and sodium acrylate copolymer and glycine consists of not only amorphous halo but also reflections of crystalline copper bisglycinate (Fig. 1 d), which indicates the ordering of complex molecules inside the polymer matrix. Ordering allows us to assume the existence of intermolecular interaction between copolymer macromolecules and molecules of Cu(II) complex with glycine.

Acknowledgement: The research was supported financially by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project X22Y3B-025).

1. M. Bouhdada, M. El Amane, N. El Hamzaoui, Synthesis, spectroscopic studies, X-ray powder diffraction data and antibacterial activity of mixed transition metal complexes with sulfonate azo dye, sulfamate and caffeine ligands, *Inorganic Chemistry Communications* **101**, 32–39 (2019).
2. V. Demchenko, S. Riabov, N. Rybalchenko et al., X-ray study of structural formation, thermomechanical and antimicrobial properties of copper-containing polymer nanocomposites obtained by the thermal reduction method, *European Polymer Journal* **96**, 326–336 (2017).

ПЛОТНОСТЬ И ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ОСАЖДЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

В.К. Меринов, Л.А. Антанюк, В.А. Лапицкий

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
vitali.merinov@gmail.com

Введение. На металлургических предприятиях образуется значительное количество различного рода отходов, к числу наименее утилизируемых относятся осажденные частицы дымовых газов. Негативными последствиями накопления подобного рода отходов являются экономические затраты и загрязнение окружающей среды. В связи с этим вопрос повторного использования отходов сталеплавильного производства является актуальной задачей современного материаловедения. В работе [1] автором было исследовано влияние осажденных частиц дымовых газов на триботехнические и виброакустические характеристики полимерных композитов.

Цель работы — исследование влияния осажденных частиц дымовых газов на плотность и теплостойкость фрикционных полимерных композитов, предназначенных для работы в узлах стационарного трения.

Материалы и методы исследования. В качестве термостойких полимерных матриц композитов использовали фторопласты Ф4 (ГОСТ 10007), Ф40 (ТУ 301-05-17-89), и полимерную композицию Ф4К20 (ТУ 6-05-1412-76). В качестве наполнителей использовалась смесь минеральных волокон, углеродного наполнителя, и осажденных частиц дымовых газов, представляющих собой однородную механическую смесь, состоящую преимущественно из сферических частиц оксидов металлов (в основном железа и цинка) размером не более 1 мкм. Содержание минерального волокна и во всех композитах было фиксировано, содержание осажденных частиц дымовых газов варьировалось от 0 до 10 мас. %. Результаты испытаний сравнивали с коммерческим композитом (ТУ ВУ 400084698.322-2022), содержащим оксид меди и бронзу.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах XS 204 DR Mettler Toledo. Теплостойкость композитов определяли по температуре размягчения термопластов методом Вика на приборе FWV 633.10.

Результаты исследования и обсуждение. На рис. 1 представлена зависимость плотности полимерных фрикционных композитов от содержания осажденных частиц дымовых газов.

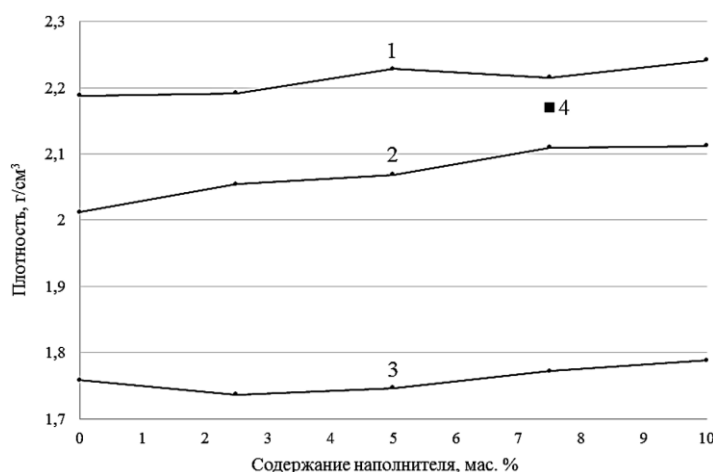


Рис. 1. Зависимость плотности полимерных композитов от содержания осажденных частиц:
1 — Ф4; 2 — Ф4К20; 3 — Ф40; 4 — коммерческий образец, наполненный оксидами меди и бронзой

Видно, что повышение содержания осажденных частиц дымовых газов приводит к увеличению плотности композитов, наибольшей плотностью обладают композиты на основе матрицы из фторопласта Ф4, наименьшее значение плотности показали композиты на основе фторопласта Ф40.

На рис. 2 представлена зависимость теплостойкости по Вика полимерных фрикционных композитов от содержания осажденных частиц дымовых газов.

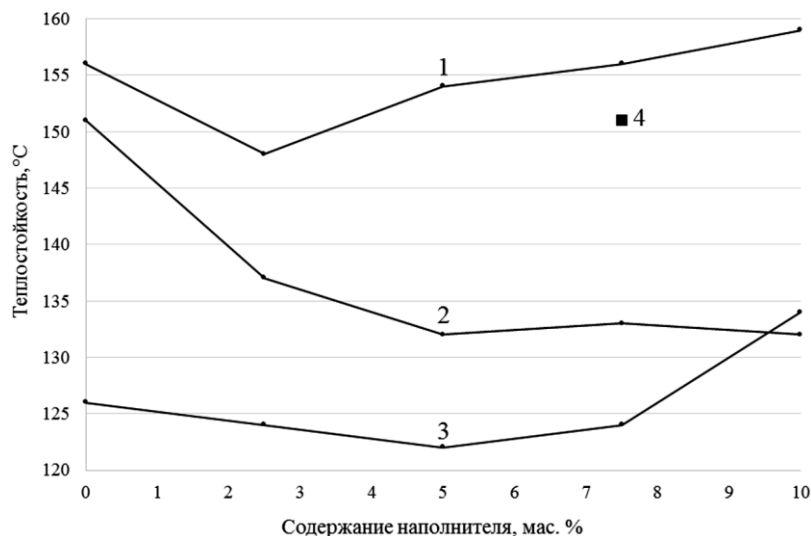


Рис. 2. Зависимость теплостойкости по Вика полимерных композитов от содержания осажденных частиц: 1 — Ф4; 2 — Ф4К20; 3 — Ф40; 4 — коммерческий образец, наполненный оксидами меди и бронзой

Установлено, что наибольшим значением теплостойкости по Вика обладают композиты на основе фторопласта Ф4. Увеличение содержания осажденных частиц дымовых газов приводит к значительному снижению теплостойкости композитов на основе полимерной композиции Ф4К20.

Анализ результатов показал, что самыми близкими по значениям плотности и теплостойкости к коммерческому композиту, наполненному оксидами меди и бронзой, оказались композиты на основе фторопласта Ф4.

Заключение. Проведенные исследования показали, что осажденные частицы являются перспективным наполнителем для использования в полимерных фрикционных композитах, предназначенных для работы в узлах стационарного трения.

1. Влияние осажденных частиц дымовых газов на триботехнические и виброакустические характеристики полимерных композитов / В.К. Меринов // Полимерные материалы и технологии. 2019. Т. 5. № 3. С. 49–56

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА, ФОРМИРУЕМЫХ ИЗ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

А.М. Михалко

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; mihalko.97@mail.ru

Цель работы — синтез из активной газовой фазы покрытий оксида вольфрама различной толщины и изучение морфологических, оптических, электрофизических характеристик.

Материалы и методы исследования. Из активной газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием порошка WO_3 были получены покрытия оксида вольфрама толщиной 38, 100 и 170 нм, а также покрытие толщиной 80 нм было нанесено в два подхода с промежуточной обработкой в плазме тлеющего разряда. Для изучения структуры и свойств были использованы методы атомно-силовой микроскопии (АСМ), оптической микроскопии, УФ-ВИД- и импедансной спектроскопии. АСМ снимки были получены на микроскопе Solver P47 PRO в полуконтактном режиме с кремниевым кантилевером NSG11S (при вершине $r = 10$ нм). Для получения УФ-ВИД спектров был использован спектрофотометр Cary-50, измерения проводились в диапазоне длин волн 190—1200 нм. Для измерения электрофизических характеристик был задействован измеритель иммитанса МНИПИ Е7-20 в частотном диапазоне 25— 10^6 Гц. Для подложек использовались пластины монокристаллического кремния, кварцевые стекла, графитовые контакты в виде встречно-штыревого конденсатора.

Результаты и их обсуждение. Сравнительный анализ морфологии по данным АСМ позволяет утверждать, что для всех образцов наблюдается формирование сплошных покрытий WO_3 . Для всех толщин покрытия характерны также хаотично расположенные включения, равномерно распределенные по поверхности, с размерами до 5 мкм. У покрытий толщиной 170 и 80 нм наблюдались единичные образования размерами до 30 мкм.

Количественный анализ данных АСМ позволил установить, что с ростом толщины покрытия уменьшается шероховатость покрытия. Покрытие толщиной 80 нм с промежуточной обработкой обладает значительно большими наношероховатостью, максимальной и средней высотой выступов. Для наглядности результаты обработки АСМ снимков сведены в табл. 1.

Таблица 1. Размерные характеристики покрытий на основании АСМ снимков 4x4 мкм

Толщина покрытия по КИТ, нм	Максимальная высота выступов, нм	Средняя высота выступов, нм	Средняя наношероховатость, нм	Средний диаметр выступов, нм
38	111	58,96	10,36	180
100	32	16,76	2,9	110
170	18	9,05	1,75	82
80	173	91,67	17,59	204

Данные УФ-ВИД спектроскопии (рис. 1, а) позволили установить высокую прозрачность (поглощение $A < 0,2$) для покрытий всех представленных толщин. Пики поглощения в области 380, 470 и 650 нм у покрытия 100 нм и в области 410 и 650 нм для покрытия 80 нм могут определять фотохромные свойства.

Ширина оптической запрещенной зоны (рис. 1, б), определенная по краю собственного поглощения покрытий, составила 4,19, 3,93, 4,28 и 4,06 эВ для покрытий толщиной 38, 100, 170 и 80 нм соответственно. Ширина запрещенной зоны уменьшается при толщине покрытия, стремящейся к 100 нм, что, по-видимому, обусловлено формированием более проводящие структур.

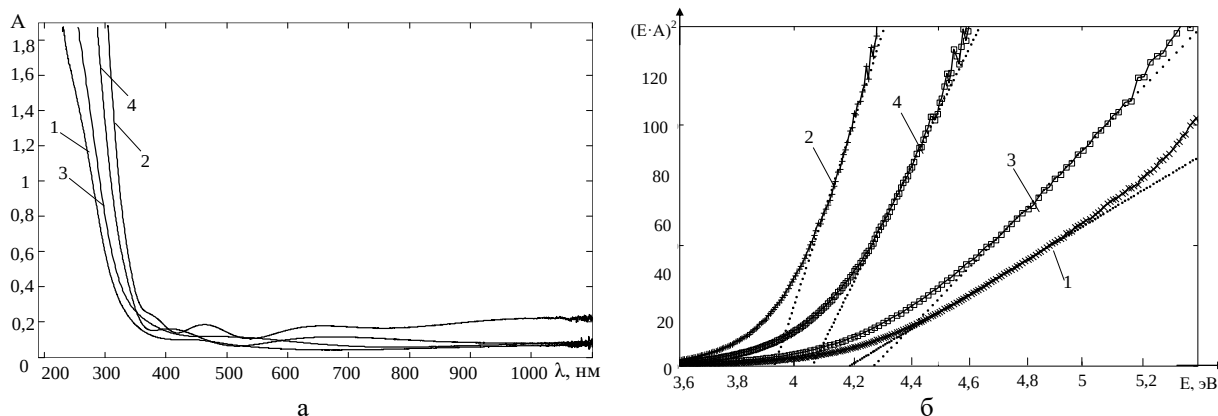


Рис. 1. УФ-ВИД спектроскопия покрытий и ширина запрещенной зоны

Графики частотной зависимости сопротивления покрытий (рис. 2, а) представляют собой наклонные с максимумами в низкочастотной области для покрытий толщиной 38, 100, 170 нм, для покрытия 80 нм характерна сложная форма кривой, что может свидетельствовать о сложной структуре и неоднородностях. Годографы импеданса (рис. 2, б) представляют собой комбинацию двух и более полуокружностей, смещенных относительно оси абсцисс, что свидетельствует сложной структуре проводящих слоев.

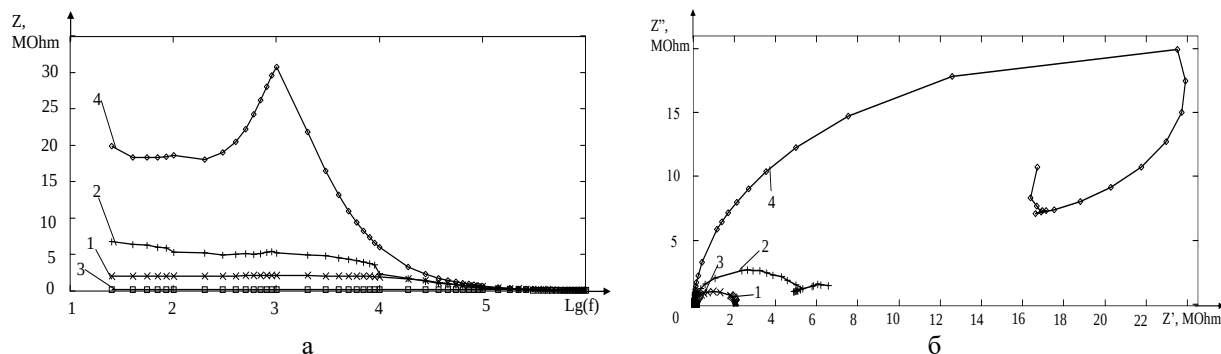


Рис. 2. Импедансная спектроскопия покрытий WO_3 : 1 — 38 нм; 2 — 100 нм; 3 — 170 нм; 4 — 80 нм

При расчетах удельная проводимость при постоянном напряжении составила 133, 15, 427, 6,3 мСм/см для покрытий $d = 38, 100, 170$ и 80 нм соответственно.

Заключение. Установлено, что для нанесенных покрытий толщиной до 170 нм характерна низкая шероховатость поверхности и высокая прозрачность при длинах волн от 400 до 1100 нм. Показана сравнительно высокая проводимость для всех представленных толщин покрытий. Перечисленные характеристики дают возможность применения представленных покрытий в оптоэлектронных, сенсорных устройствах, функциональных слоев «умных» стекол.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР (комплексное задание 2.4.02.01, № госрегистрации 20212074)

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

И.В. Предчанко, В.А. Жаранов, И.Б. Одарченко

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

Введение. Современный аппарат компьютерного моделирования создает возможность проведения комплексной разработки литейной технологии на основе оценки геометрической сложности параметров трехмерных моделей отливок. При этом возможности создания алгоритма компьютеризированной оценки сложности геометрии тела отливки не раскрыты в полной мере. В частности, отсутствует универсальная система признаков, характеризующих критериальные связи между параметрами геометрической сложности и критериями технологичности отливки, а также производственно-технологическими условиями и режимами их изготовления. Разработка методики кластеризации групп отливок, связывающих их конструктивные особенности (признаки) и необходимые технологические параметры процесса производства, созданные на основе методов параметрического калькулирования, по нашему мнению позволит перейти к универсальной системе признаков, способных охарактеризовать требования к технологии изготовления любой отливки. Кроме того, следует отметить, что геометрическая сложность отливок коррелирует с затратами на обеспечение качества, трудоемкостью и ресурсоемкостью процессов их производства. [1] В этом смысле рассматриваемая система кластеризации отливок может быть доработана и использована в качестве основы при создании автоматизированного продукта для оценки себестоимости отливок и экономической эффективности процессов их производства.

Материалы и методы исследования. При решении задач кластеризации, отличающихся открытым множеством возможных классов, предлагается использовать интеллектуальный подход, который называется «кластеризацией с помощью самоорганизующихся нейронных сетей». Суть этого подхода состоит в том, что нейрон с вектором веса, наиболее близким к вектору входа, выигрывает конкуренцию в борьбе за этот вектор. Последующий рекуррентный алгоритм приведет к тому, что, когда на вход сети поступит достаточно большое количество векторов, каждая группа близких из них окажется связанной только с одним из нейронов слоя.

Подобная кластерная система позволяет осуществить разбиение отливок на однородные группы (кластеры или классы). [2] Графически выборки представлены точками в признаковом пространстве, а задача кластеризации сводится к определению «сгущений точек» (рис. 1).

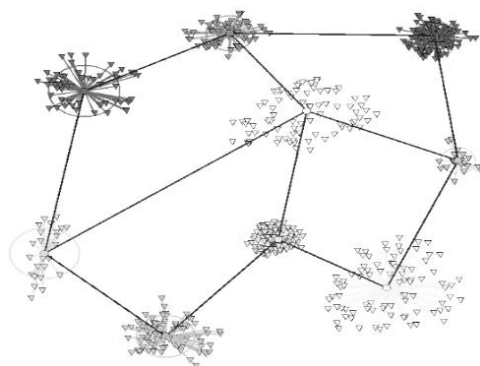


Рис. 1. Мета-структура кластеризованного блока диапазона записей базы данных

Результаты и их обсуждение. В рамках проделанной работы нейросетевая кластеризация более объективна при генерации матрицы групп отливок в количестве 6×6 (36 индивидуальных групп отливок по комплексной технологической сложности), матрицы 3×3 (9 индивидуальных групп отливок по технологической идентичности) и матрицы 6×6 (по геометрическому подобию). При кластеризации отливок нейронная сеть обучалась по

важнейшим параметрам технологии, таким как геометрические характеристики 3D-модели отливки, особенностям заполнения формы расплавом, требованиям к качеству изготовления и допускаемым дефектам (рис. 2).

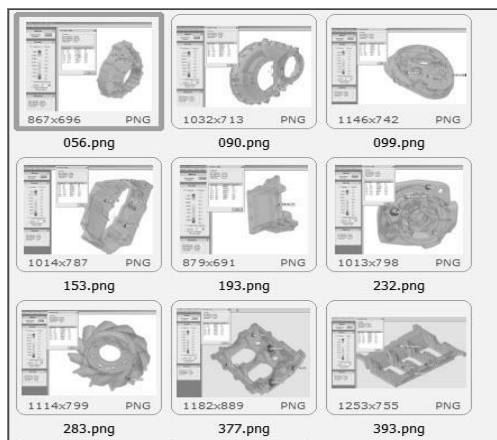


Рис. 2. Иллюстрация подгруппы отливок по конструктивной идентичности

Заключение. Установлено, что в процессе обучения нейронной сети особенности, отличающие отливки друг от друга, составляют информационную базу, позволяющую отнести отливку к соответствующему классу по назначению. При этом информация о каждой отливке представлена в виде вектора конструктивных и технологических характеристик, которые наиболее достоверно соответствуют требованиям моделирования нейронной сети.

Регрессионный анализ зависимости продолжительности затвердевания (результаты моделирования) двух кластеризованных групп из базы данных отливок (рис. 3) показал высокую степень точности прогностических зависимостей в пределах одного кластера отливок.

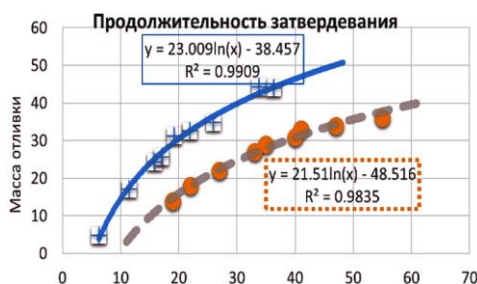


Рис. 3. Регрессионный анализ продолжительности затвердевания группы отливок одного кластера в зависимости от массы отливки

1. Одарченко, И.Б. Интеграция нейросетевых моделей в процессы технологической подготовки производства отливок / И.Б. Одарченко, В.А. Жаранов, И.Н. Прусенко // Литье и металлургия. – 2018. – № 4 (93). – С. 45–49.
2. Прусенко, И.Н. Применение средств компьютерного анализа в классификации сложности отливок / И.Н. Прусенко, В.А. Жаранов ; науч. рук. И. Б. Одарченко // Исследования и разработки в области машин-я, энергетики и управления : материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2020. – С. 107–110.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОВМЕСТНЫХ РАСТВОРОВ НАТРИЕВОЙ СОЛИ КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ С АЛЬГИНАТОМ НАТРИЯ

Ю.С. Просмыцкая, Д.Д. Лаппо

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; prosmjulia47@gmail.com

Введение. Одной из разновидностей средств местного применения для предотвращения образования спаек после хирургических вмешательств являются полимерные гели и пленки. Принцип их действия состоит в механическом разделении тканей, устойчивым к резорбции барьером, который должен определенное время сохраняться в организме, а потом деградировать без воспалительной реакции.

Известно применение для получения таких полимерных материалов различных полисахаридов и их смесей. Например, известно использование для этой цели композиционных гидрогелевых мембран, содержащих

в своем составе карбоксиметилцеллюлозу в форме натриевой соли (Na-КМЦ), связанную в комплекс с полиэтиленоксидом. Это барьерное средство, несмотря на простоту доставки в зону операции, при проведении клинических испытаний не получило единогласного одобрения экспертов [1].

Цель исследования — изучение реологических свойств водных растворов Na-КМЦ, содержащих в качестве структурирующего агента альгинат натрия (АН) вместо полиэтиленоксида. Наличие у пленок, полученных из таких растворов, антиспаечной активности было показано нами ранее при исследовании *in vivo* на белых крысах-самцах линии Vistar [2].

Материалы и методы. Na-КМЦ (производитель — Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd): вязкость (раствор 1 %, сухая основа, 25 °C) — 1500—2000 МПа·с, pH (1 % р-ра) — 6.0—8.5), АН (ГОСТ 33310-2015). Концентрация полимеров в растворе составляла 2 мас. % при соотношении компонентов 90:10, 80:20 и т.д. Исследования реологических свойств формовочных растворов проводились на ротационном вискозиметре Brookfield R/SPlus. Деаэрированный раствор (17 см³) помещали в выбранную измерительную ячейку ротационного вискозиметра, предварительно нагретую до необходимой температуры. Раствор термостатировали при пяти различных температурах: 25, 35, 45, 55 и 65 °C, после чего производили измерения по специально созданной программе, согласно которой скорость сдвига изменялась ступенчато в направлении увеличения и последующего уменьшения скорости сдвига. Энергию активации вязкого течения рассчитывали при помощи уравнения Френкеля-Эйринга-Андрате [3] при близких значениях напряжения сдвига (200 Па). Также были исследовано соответствие экспериментальных реологических параметров растворов теоретическим реологическим моделям, в качестве которых были взяты степенной закон Оствальда-де-Вилла, модели Гершеля-Балкли, Бингама и Кэссона, а также рассчитаны коэффициенты для всех указанных уравнений.

Результаты и их обсуждение. Как следует из рис. 1, растворы во всем интервале соотношений компонентов проявляют псевдопластический характер течения: вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига. Такое реологическое поведение сохраняется во всей исследованной температурной области.

Линейный характер зависимости эффективной вязкости от обратной температуры позволил для всех составов растворов рассчитать значения кажущейся энергии активации вязкого течения, характеризующей степень структурированности растворов, то есть плотность узлов флуктуационной сетки зацеплений. Как следует из данных табл. 1, добавление Na-КМЦ к раствору АН приводит к уменьшению степени его структурированности, в то время как введение АН в раствор Na-КМЦ вызывает рост интенсивности межмолекулярных взаимодействий, поскольку значения E_A при этом растут.

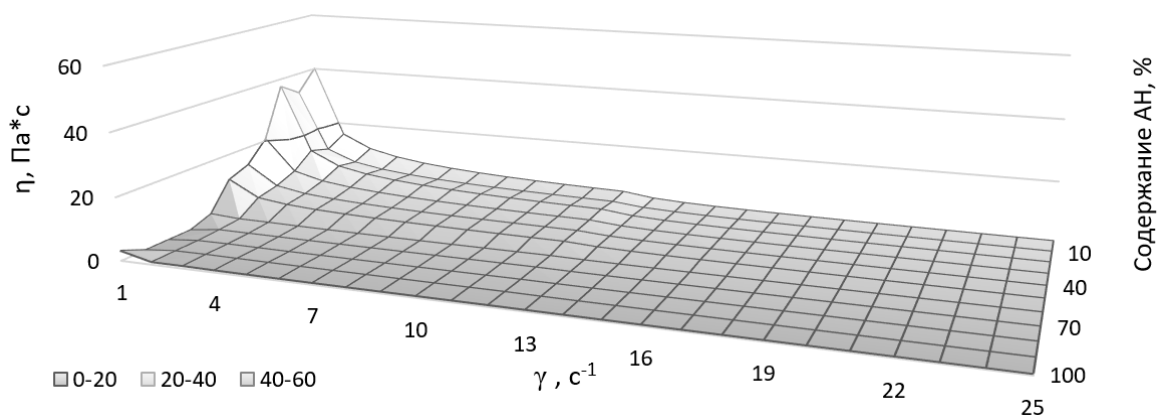


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости от скорости сдвига для бикомпонентных растворов Na-КМЦ и АН

Таблица 1. Рассчитанные значения кажущейся энергии активации вязкого течения для бикомпонентных растворов КМЦ:АН различного состава

Соотношение КМЦ:АН	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70	20:80	10:90	0:100
E_A , кДж/моль	8,66	10,39	9,85	9,34	8,43	7,78	7,21	6,84	7,32	8,71	8,78

Сопоставление поведения исследованных растворов в условиях сдвигового деформирования с реологическими моделями свидетельствует о том, что наибольшие значения коэффициентов корреляции достигаются для модели Гершеля-Балкли.

Заключение. Установлена корреляция реологического поведения растворов с физико-механическими свойствами, полученных из них пленок, а также их эффективностью в профилактике спайкообразования в

экспериментах *in vivo*. Так, прочность пленок возрастает, а относительное удлинение падает при увеличении АН. В то же время было установлено, что при повышении концентрации АН в пленках уровень спайкообразования у животных снижается.

1. Assietti, R. Use of carboxymethylcellulose/polyethylene oxide gel in microdissectomy with interlaminectomy: A case series comparison with long-term follow-up / R. Assietti, A. Mora, M. Brayda-Bruno // *Spine (Phila. Pa. 1976)*. – 2008. – Vol. 33, № 16 – P. 1762–1765
2. Канунникова, А.Р. Использование биodeградируемых плёнок на основе природных полисахаридов для предотвращения развития послеоперационного спайкообразования у крыс / А.Р. Канунникова, Ю.С. Просмыцкая // Молодежь в науке 2020: Тезисы XVII международной конференции молодых ученых (Минск, 22–25 сентября 2020 г.) / Национальная академия наук Беларуси; редкол.: В.Г. Гусаков [и др.]. – Минск, 2020. – С. 363–365.
3. Lagarrigue, S. The rheology of starch dispersions at high temperatures and high shear rates: A review / S. Lagarrigue, G. Alvarez // *J. Food Eng.* – 2001. – Vol. 50, № 4 – P. 189–202.

УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ СТАЛИ 16CRMNS5

А.В. Рабков¹, И.Н. Степанкин², Е.П. Поздняков¹,
Д.В. Куис³, А.Б. Найзабеков⁴, С.Н. Лежнев⁴

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь; hanter3@gstu.by

²Белорусский научно-исследовательский институт нефти, Гомель, Беларусь

³Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

⁴Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

Введение. В большинстве случаев эксплуатационные характеристики деталей машин и штамповой оснастки зависят от механических свойств их поверхности. В случае износостойкости главным параметром является твёрдость материала. Для её повышения применяют различные способы поверхностного упрочнения, среди которых наибольшее распространение в промышленности связано с изменением количества углерода — цементация и нитроцементация. В качестве упрочняемых материалов традиционно используют низкоуглеродистые стали марок 18ХГТ, 12ХН3А, 20Х, 20Х2Н4А и др. [1, 2]. В настоящее время на ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга БМК» проводится плавка марки стали 16CrMnS5 в соответствии с DIN EN 10084, экспортируемой в Европейский Союз. Однако на территории СНГ и ближнего зарубежья она не получила широкого распространения из-за малой информативности о её свойствах. Поэтому актуальным является вопрос исследования влияния фазовых составляющих на свойства поверхностно-модифицированных слоёв стали 16CrMnS5 для последующего сравнения с известными сплавами.

Материалы и методы исследования. В качестве материала для исследований выбрана сталь 16CrMnS5 с термодиффузионно-упрочнёнными слоями. Диффузионное насыщение сплава осуществлялось путем проведения цементации при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов и нитроцементации при температуре 860 °С в течение 6 и 8 часов в твердом карбюризаторе. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры 860 °С и отпуск при 200 °С в течение 1 часа. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [3]. Испытания проводились при амплитуде контактных напряжений 950 МПа с достижением предельного износа 0,6 мм.

Результаты и их обсуждение. Микроструктура цементованных слоёв состоит из мартенсита, аустенита и карбидов. Объёмное количество последних составило 18 % и 26 % после 8-ми до 12-ти часов насыщения соответственно. Их максимальный размер достиг 20 мкм. Микротвёрдость поверхности слоёв составила 7000—7500 МПа при общей толщине 1,9—2,1 мм. Микроструктура нитроцементованных слоев ожидаемо отличается от цементованных. Структура слоя, сформированного после 6-ти часовой нитроцементации, состоит из мартенсита и остаточного аустенита, а после увеличения длительности ХТО до 8-ми часов в поверхностном слое обнаружены мелкодисперсные включения предположительно карбонитридного типа с максимальным размером не более 5 мкм. Микротвёрдость поверхности нитроцементованных слоев оказалась близкой к цементованным — 6950—7500 МПа. Главным отличием нитроцементованных слоёв от цементованных оказалось снижение их общей толщины примерно в 2 раза — до 1,0—1,1 мм.

На рис. 1 приведён график зависимости износа термодиффузионно-упрочнённых слоев стали 16CrMnS5 от числа циклов нагружения. Анализ кривых показал, что зависимости износа всех слоёв имеют близкое распределение с тремя этапами изнашивания. На первом этапе, длительностью 1000—1500 циклов, происходит приработка контактирующих поверхностей образцов и контртела. Уже на данной стадии протекает образование наклёпа с формированием мелких частиц на контактной поверхности образцов. Второй этап отличается высокой износостойкостью всех слоёв. Процесс образования мелких частиц деформированного материала с последующим их удалением продолжается. Максимальной износостойкостью обладают образцы после 6-ти часовой нитроцементации (19360 циклов), а

минимальной — после 12-ти часовой цементации (15040 циклов). Глубина лунки износа для всех партий образцов не превысила 0,05 мм. На третьем этапе интенсивность изнашивания повышается. В процессе увеличения наработки формирующиеся трещины контактной усталости растут, образуя питтинги. Их появление провоцирует уменьшение площади контакта с увеличением напряжений. Предельный износ науглероженные образцы достигли при 39—40 тысяч циклов нагружения. Отличительной особенностью нитроцементованных образцов является аномально высокая скорость изнашивания при достижении лунки износа порядка 0,4 мм (~ 32 тысячи циклов). Это связано с резким снижением микротвёрдости до 5500 МПа на глубине около 0,6 мм, после превышения которой материал имеет низкую способность сопротивляться воздействию контактных нагрузок при данных напряжениях.

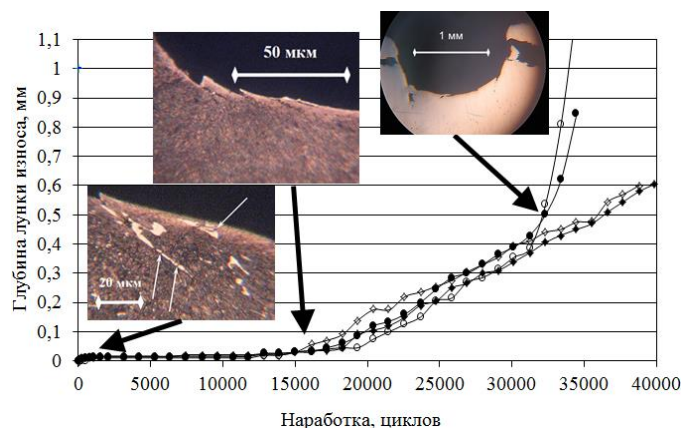


Рис. 1. Зависимости износа термодиффузионно-упрочненных слоёв стали 16CrMn5S:
♦ — 8-ми и ◇ — 12-ти часовая цементация; ○ — 6-ти и ● — 8-ми часовая нитроцементация

Заключение. При контактных напряжениях 950 МПа высокой износостойкостью при достижении износа не более 0,05 мм обладают все исследованные слои — от 15040 до 19360 циклов нагружения. Вследствие формирования мелких частиц на контактной поверхности образцов протекает их постепенное удаление, что, в конечном итоге, провоцирует образование и рост трещин контактной усталости в более глубоких слоях материала. Удаление более крупных частиц приводит к образованию питтингов, что уменьшает контактную площадь поверхности и возрастание действующих напряжений. В результате износ сплава интенсифицируется. Максимальной износостойкостью обладают цементованные слои, которые достигли предельного износа (0,6 мм) при 39—40 тыс. циклов нагружения;

Низкая стойкость нитроцементованных образцов при достижении глубины лунки износа порядка 0,4 мм связана с резким снижением твёрдости материала. Для деталей машин, у которых допустимый износ поверхности превышает 0,4 мм, нитроцементацию проводить не рекомендуется.

1. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. — М.: Металлургия, 1985. — 256 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г.В. Борисенко [и др.]. — М.: Металлургия, 1981. — 424 с.
3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ: пат. ВУ 7093 / И.Н. Степанкин, В.М. Кенько, И.А. Панкратов. — Оpubл. 28.02.2011.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ PH СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Е.О. Рещиков¹, С.В. Чернышов¹, П.П. Бесшапов², М.В. Прожега^{1, а}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия;

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; ^аmaksim.prozhega@yandex.ru

Введение. Эрозионно-коррозионному изнашиванию подвержены элементы систем очистки сточных вод, а также механизмы, работающие в потоке агрессивных жидкостей, которые встречаются в различных отраслях промышленности [3, 6].

Исследования эрозионно-коррозионного изнашивания в основном проводят в отсутствие в составе жидкости абразивных частиц, поскольку испытания с абразивом представляют определенные методологические и технические трудности [3].

В работе [5] проведены исследования стойкости к эрозионно-коррозионному изнашиванию покрытий на

основе никеля в условиях содержания в среде абразивных частиц. Оработана методика испытаний. Описанный в работе стенд позволяет поддерживать состав среды постоянным с заданной концентрацией абразива.

Влияние водородного показателя pH среды с абразивом на скорость эрозионно-коррозионного изнашивания в настоящий момент не изучено [3].

Цель работы — проведение испытаний образцов из различных металлов в среде с высоким значением pH (не менее 12,0) для определения влияния щелочной среды на скорость эрозионно-коррозионного изнашивания.

Материалы и методы исследования. Установка для исследования эрозионно-коррозионного изнашивания разработана в ИМАШ РАН и описана в работе [5]. Для испытаний изготовили образцы из 4 материалов: бронза, сталь Ст3, сталь 40Х, чугун СЧ30. Испытания проводили в нейтральной среде — вода (pH = 7,0) и в щелочной — вода с добавлением препарата для обеззараживания сточных вод «ИЛОСАН-V» 25 % (ТУ 20.59.59-002-01368392-2020, ООО «Илосан», Россия) [4] в соотношении 3:1 соответственно, pH не менее 12,0. Режимы испытаний приведены в табл. 1. Испытания проводили до достижения расхода абразива — 1600 г.

Таблица 1. Режимы испытаний

Время испытания, мин	Расход жидкости, л/мин	Абразив Размер зерна, мкм	Расхода абразива, г/мин	Скорость потока, м/с
не более 60	0,8—1,1	электрокорунд 106—125	28,1—31,5	1—1,4

Износостойкость образцов оценивали по скорости изнашивания, мм³/мин:

$$v = (m_0 - m_1)/\rho t, \quad (1)$$

m_0 , m_1 — масса образца до и после испытания соответственно, г; ρ — плотность образца, г/мм³; t — время испытания, мин.

Результаты и их обсуждение. Скорость изнашивания материалов по результатам испытаний в нейтральной и щелочной средах приведена на рис. 1. Наибольшую скорость эрозионно-коррозионного изнашивания при испытаниях в нейтральной среде наблюдали у образца из чугуна, наименьшую — у стали 40Х.

При переходе к щелочной среде испытаний скорость изнашивания бронзы возрастает в 1,4 раза, изменение величины для остальных материалов остается в пределах погрешности. Лучшую износостойкость в экспериментах с водой и с добавлением препарата Илосан показал образец из стали 40Х.

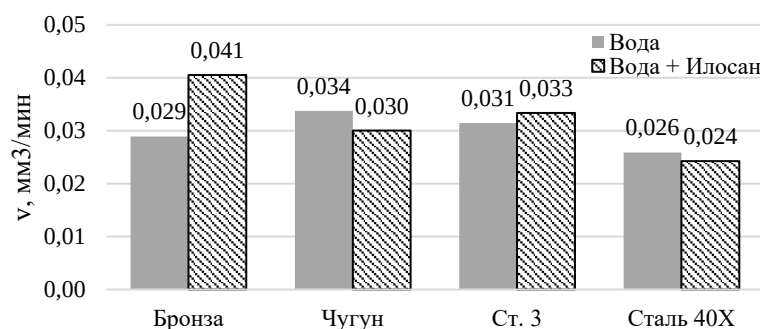


Рис. 1. Скорость изнашивания образцов

Высокое значение водородного показателя среды испытаний pH не менее 12,0 существенно не влияет на стойкость исследованных материалов к эрозионно-коррозионному изнашиванию за исключением бронзы. Чугун, Ст. 3 и сталь 40Х в нейтральной среде и в воде с добавкой препарата для обеззараживания сточных вод Илосан показывают одинаковую в пределах доверительного интервала скорость изнашивания.

Возрастание скорости изнашивания образца из бронзы объясняется наличием в составе препарата Илосан гидроксида аммония (NH₃·H₂O), который диссоциирует в воде на аммиак и гидроксид-ион и может вступать в реакцию с медью и медьсодержащими сплавами, и является сильным коррозионным агентом для этих материалов [5].

Закключение. Показали, что щелочная среда (pH > 12,0) не оказывает существенного влияния на скорость эрозионно-коррозионного изнашивания чугуна, стали и бронзы.

Повышенная скорость изнашивания бронзы связана с наличием в составе рабочей жидкости гидроксида аммония, который вызывает усиленную коррозию сплавов на основе меди.

1. Burson-Thomas C. B., Wood R. J. K. Developments in erosion–corrosion over the past 10 years // J. Bio. Tribo. Corros. — 2017 (3), 14

2. Sun Z, Wei Yu., Wu W., Du H. Erosion of alloys used for the stages of electrical submersible pumps // Engineering Failure Analysis. — 2020 (114), 104580.
3. Nazarov A. N. et al. Research of nickel-based coatings erosion-corrosion wear // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2020 (747), 012038
4. Илосан сайт. — URL: <https://ilosan.ru/> (дата обращения: 01.09.2021)
5. Yan Zh. et al. Failure analysis of Erosion-Corrosion of the bend pipe at sewage stripping units // Engineering Failure Analysis. — 2021 (129), 105675.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Е.О. Решиков, М.В. Прожега^а, Н.Н. Смирнов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия; ^аmaksim.prozhega@yandex.ru

Введение. Подшипники качения применяются во всех отраслях промышленности, в том числе в космической отрасли. Подшипники качения работают со смазкой маслом или пластичными смазочными материалами (ПСМ). ПСМ состоят из базового масла, синтетического или минерального, загустителя и добавок. Смазочная способность зависит от базового масла и загустителя. Загуститель придает ПСМ нужную вязкость, которая не позволяет смазке вытекать из подшипника, поэтому 80 % всех подшипников качения смазываются при помощи ПСМ [2].

В космических условиях смазывание поверхностей осложняется экстремальными условиями космоса: высокий вакуум, повышенные или криогенные температуры, радиационное излучение и др. Жидкие смазочные материалы из-за низкого давления быстро улетучиваются, поэтому в космосе используют ПСМ, твердые смазки и самосмазывающиеся материалы [3, 7].

Цель работы — определение ресурса ПСМ в подшипниках качения в экстремальных условиях: вакууме (давлении не более 10^{-3} Па) с нагревом до 100 °С.

Материалы и методы исследования. Оценивали ресурс трех ПСМ с различными типами базовых масел и загустителей (табл. 1). Для проведения испытаний использовали трибологический стенд для испытаний в вакууме разработки ИМАШ РАН.

Таблица 1. Исследуемые ПСМ

№	ПСМ	Базовое масло	Загуститель	Температура эксплуатации
1	ВНИИ НП-274	Силикон	Мыльный	–80...+160 °С
2	«Аметист»	Перфторполиэфир	Органосиликагелевый	–110...200 °С
3	«Ника»	Перфторполиэфир	Политетрафторэтиленовый	–130...200 °С

Перед испытанием подшипники промывали и на высушенное кольцо подшипника наносили 15—20 мг образца ПСМ. Температура в зоне испытания — 100 °С, нагрузка на подшипник — 2930 Н. Во время испытания регистрировали при помощи программного обеспечения коэффициент трения, давление в камере и температуру в зоне трения. Испытания проводили до роста коэффициента трения в 3 раза по сравнению со значением параметра в начальный момент испытания. Испытание каждого образца ПСМ проводили 3 раза.

Для оценки ПСМ сравнивали коэффициент трения в установившемся режиме и относительный ресурс R :

$$R = n/m, \quad (1)$$

где n — количество оборотов кольца подшипника за время испытания, m — масса нанесенного ПСМ, мг.

Результаты и их обсуждение. Наименьший относительный ресурс зафиксировали у образца ПСМ № 1 ВНИИ НП 274 — время испытаний не превышало 13 мин. Образец смазки № 2 Аметист обладает ресурсом в 6 раз больше, время испытаний составляло 65—98 мин. Лучший результат у ПСМ № 3 Ника: относительный ресурс смазки на 10 % выше, чем у образца № 2, а время опыта 86—142 мин.

По результатам исследования силиконовая смазка в вакууме и при температуре 100 °С показывает меньшее значение относительного ресурса и нестабильный коэффициент трения. Ресурс ПСМ на основе перфторполиэфира сопоставим и в 6 раз превосходит смазочный материал на основе силикона.

В условиях граничной смазки, которая возникает в подшипниках качения за счет вытеснения смазочного материала с дорожек качения при высокой нагрузке на подшипник, силиконовые смазки быстро деградируют [4].

Исследования [1] показывают, что в вакууме силиконовые смазки обладают меньшим ресурсом, чем смазки на основе PFPE.

При близких значениях относительного ресурса образцов на основе PFPE смазка № 2 Аметист имеет коэффициент трения в 4,2 раза выше, чем ПСМ № 3 Ника. Мы связываем повышенный коэффициент трения образца № 2 с более высокой (в 2 раза) вязкостью.

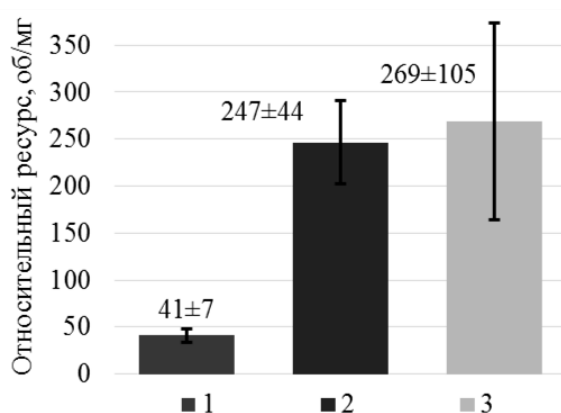


Рис. 1. Средний относительный ресурс ПСМ

Заключение. Определили ресурс и коэффициент трения трех образцов ПСМ при работе в вакууме (давление менее 10^{-3} Па) и при повышенной температуре (100 °С).

ПСМ на основе перфторполиэфира лучше работают в экстремальных условиях по сравнению с силиконовыми смазками. Лучший результат показал образец ПСМ № 3 Ника.

1. Lugtab P.M. Modern advancements in lubricating grease technology // Tribology International. – 2016. – 97. – pp. 467–477
2. Luo J., Zhou X. Superlubricative engineering—Future industry nearly getting rid of wear and frictional energy consumption // Friction. – 2020 (8), 643–665
3. Zhuang W. et al. Comparing space adaptability of diamond-like carbon and molybdenum disulfide films toward synergistic lubrication // Carbon. – 2018 (134), 163–173
4. Sathyan K., Hsu H. Y., Lee S. H., Gopinath K. Long-term lubrication of momentum wheels used in spacecrafts — An overview // Tribology International. – 2010 (43), 259–267
5. Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов. Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет. – 2007

СТЕНД ДЛЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПО ASTM G99

Е.О. Рещиков, Е.О. Константинов, М.В. Прожега^a

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия; ^amaksim.prozhega@yandex.ru

Введение. Для исследования природы трения и механизмов изнашивания, оценки свойств износостойких и антифрикционных материалов и покрытий, изучения свойств смазочных материалов широко применяют трибологические испытания. В настоящее время на рынке отсутствует отечественное оборудование для трибологических испытаний, а зарубежная техника слишком дорогостоящая. В этих условиях для проведения исследований используют морально устаревшие машины трения, которые иногда модернизируют прежде всего с целью измерять коэффициент трения во время испытания [1, 2].

Поскольку различные режимы испытаний: кинематическая схема, геометрическая форма образцов, нагружение и условия окружающей среды отражаются на результатах исследований, следует использовать стандартные методики [3].

За рубежом широко используется кинематическая схема испытаний штифт–диск или шар–диск, которая соответствует стандарту ASTM G99 при вращательном движении или ASTM G133 — при возвратно-поступательном движении. Такая кинематическая схема применяется при исследовании трения при высоком контактном давлении. Индентор в форме шара обеспечивает самоустановку, что не достигается при использовании другой формы. Самоустановка образца обеспечивает повторяемость результатов исследований [4].

Цель работы — разработка стенда для трибологических испытаний материалов и покрытий по кинематической схеме — «шар–диск» в соответствии с международным стандартом ASTM G99.

Конструкция. Конструкция стенда приведена на рис. 1.

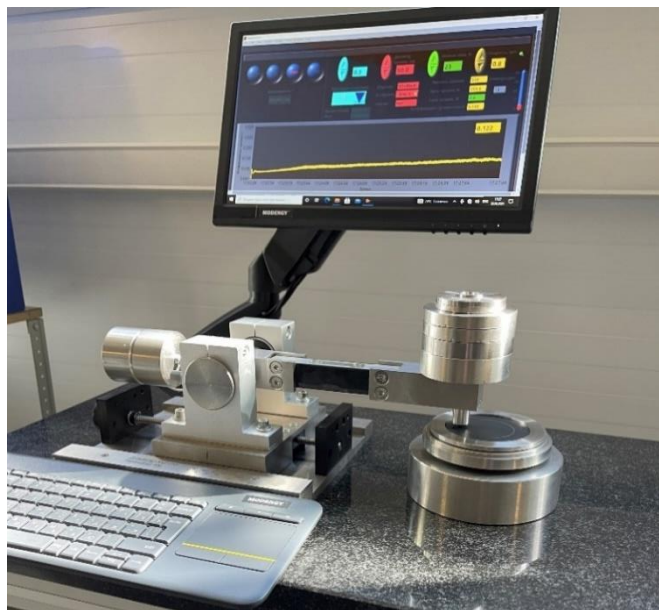


Рис. 1. Трибологический стенд

Технические характеристики стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы испытаний

№	Параметр	Значение
1	Диапазон измерения коэффициента трения	0,05—1,00 ($\pm 1,5\%$)
2	Скорость скольжения, м/с	0,1—1,0
3	Максимальное усилие на индентор, Н	25
4	Диаметр шарика (штифта), мм	10 или 6
5	Размер образца, мм	40
6	Макс. крутящий момент, Н·м	1
7	Мощность двигателя, Вт	0,3
8	Габаритные размеры, мм	360×220×600

Разработанный стенд обладает следующими преимуществами. Испытания в широком диапазоне скоростей, плавное регулирование скорости достигается при помощи частотного преобразователя. Постоянная нагрузка в процессе испытания обеспечивается грузами заданной массы. Радиус дорожки трения изменяется при помощи подвижной каретки с индентором, что позволяет исследовать образцы различного диаметра, а также проводить несколько испытаний на одно образце. Возможность исследования смазочных материалов обеспечивается сменной оснасткой. Коэффициент трения в процессе испытания измеряется тензодатчиком, данные в цифровой форме выводятся на экран и сохраняются на компьютере для последующей обработки.

Заключение. Разработан доступный стенд для трибологических испытаний в соответствии с международным стандартом ASTM G99.

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

АНАЛИЗ УПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ НЕПРЕРЫВНО АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.П. Сазанков

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

Введение. Прогресс в машиностроении связан с разработкой и широким внедрением конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе непрерывно армированных стеклотканями и длинными стекловолокнами [1]. Такие ПКМ обладают выгодной комбинацией физико-механических свойств с высокими упругими и прочностными показателями, открывая широкие возможности для совершенствования изделий, например, кузовных элементов транспортных машин, включая электромобили. В этой связи необходима характеристика деформационных свойств указанных материалов методами механических испытаний [2, 3].

Цель работы — сопоставление упругих характеристик непрерывно армированных конструкционных стеклопластиков при различных видах статического нагружения.

Материалы и методы исследования. 2 непрерывно армированных конструкционных стеклопластика на полиэфирной матрице: ортотропный композит с тканевым наполнителем (материал А, рис. 1, а) и квазиизотропный композит, полученный ненаправленным армированием стекловолокном (материал В, рис. 1, б), покрытые с лицевой стороны декоративным слоем полиметилметакрилата, влияние которого на механические свойства композитов является несущественным. Геометрические размеры образцов составляли 200×24×5,5 мм для материала А и 200×24×4,6 мм для материала В соответственно.

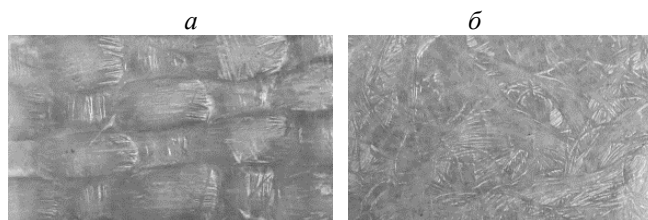


Рис. 1. Тип укладки стекловолокна для материала А (а) и В (б)

Для сопоставления модуля упругости и коэффициента Пуассона при различных видах статического нагружения одинаковые по геометрической форме и размерам образцы вышеуказанных материалов испытывались на машине Инстрон 5567 при растяжении, сжатии по ГОСТ Р 56812 [4] и трехточечном изгибе. Скорость нагружения составляла 1,3 мм/мин, задаваемая деформация при растяжении и сжатии $\varepsilon_{p,c} = 0,3\%$, при изгибе $\varepsilon_n = 0,6\%$. Определение модуля упругости осуществлялось по перемещениям подвижной traversы машины и тензометрированием продольных и поперечных деформаций образца на приборе TS32L1 с установкой тензодатчиков базой 10 мм и сопротивлением 200 Ом в ортогональных направлениях.

Результаты и их обсуждение. Зависимости «напряжение — деформация» стеклопластика в упругой стадии представлены на рис. 2, а значения модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении, сжатии и трехточечном изгибе в табл. 1. Соотношения упругих характеристик материалов А и В обусловлены более сильным армирующим действием стеклоткани в сравнении с стекловолокном. Заниженные значения модулей упругости E_p , E_c и E_n обусловлены, очевидно, деформациями применяемой оснастки. Для материала А характерны также более высокие значения коэффициента Пуассона μ .

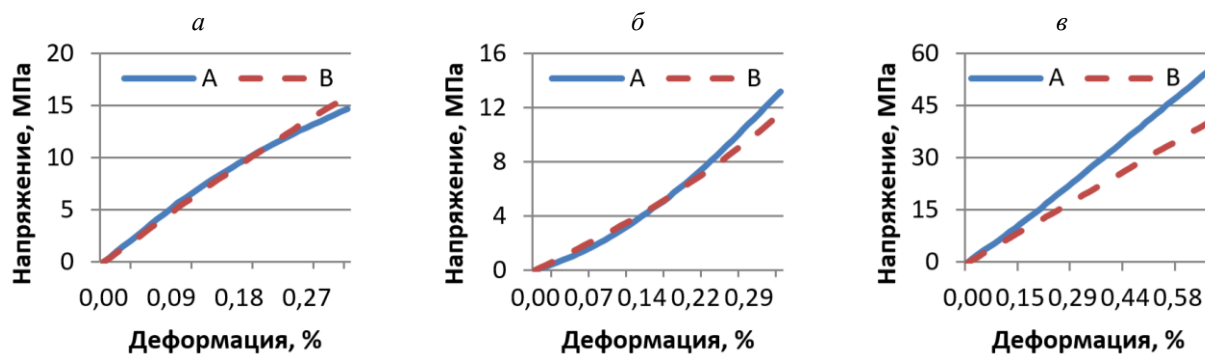


Рис. 2. Зависимости напряжения и деформации материала при растяжении (а), сжатии (б) и изгибе (в)

Таблица 1. Характеристики модуля упругости и коэффициента Пуассона стеклопластиков А и В

Матер.	E_p^H , ГПа	E_c^H , ГПа	$E_{из}^H$, ГПа	E_p^T , ГПа	E_c^T , ГПа	$E_{из}^T$, ГПа	ν_p	ν_c	$\nu_{из}$
А	5,80	7,63	7,40	9,17	17,87	9,73	0,45	0,62	0,35
В	5,23	6,27	7,83	7,00	9,07	5,72	0,34	0,45	0,20
А/В				1,31	1,97	1,70			

Примечание. E^H , E^T — модули упругости, полученные в программном обеспечении Инстрон 5567 по перемещениям траверсы машины и с помощью тензометрической станции TS32L1 соответственно. Индексы «р, с, и» обозначают виды испытаний: растяжение, сжатие и изгиб.

Заключение. В работе исследовано упругое поведение хаотично- и направленно армированного стеклопластиков, определены упругие характеристики (модуль упругости, коэффициент Пуассона). Установлено, что материал А характеризуется существенно более высокими значениями модуля упругости и коэффициента Пуассона в сравнении с материалом В.

Благодарности. Работа выполнена по заданию 4.2.3 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» и при поддержке БРФФИ (T21ЭТ-016). Автор выражает благодарность Шилько С.В. и Дробыш Т.В. за помощь в проведении испытаний.

1. Афанасьев Б.А., Даштиев И.З. Проектирование элементов подсистем автомобиля из композиционных материалов: учеб. пособие / под ред. Б.А. Афанасьева. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 136 с.
2. Физические и механические свойства стеклопластиков: справочное пособие / под ред. Ю.М. Молчанова. Рига: Зинатне, 1969. 268 с.
3. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. — 2-е изд. перераб. М.: Химия, 1981. 85 с.
4. ГОСТ Р 56812-2015. Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке. Введен 2017-01-01. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ СЛОИСТЫХ МЕТАЛ-УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

К.А. Саховский, Д.Г. Пилипцов

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель; sakhovskij.kirill.07@gmail.com

Введение. Известно [1], что перспективным методом для формирования композиционных покрытий на основе углерода и металла является сочетание дугового метода для осаждения металлической компоненты покрытия и импульсного вакуумно-дугового разряда для формирования углеродной компоненты покрытий. Одним из способов управления структурой покрытий, активизацией фазовых переходов и образованием новых фаз и соединений в объеме слоя является термообработка [2].

Цель работы — установить влияние режимов термообработки на структуру многослойных метал-углеродных покрытий.

Материалы и методы исследования. Для получения слоистых покрытий использовали установку вакуумного напыления УВНИИПА-070, содержащую дуговой испаритель постоянного тока с катодом из титана, импульсный генератор углеродной плазмы и высокоэнергетический ионный источник типа «Радикал», предназначенный для очистки и нагрева подложек. На рис. 1 представлена схема эксперимента.

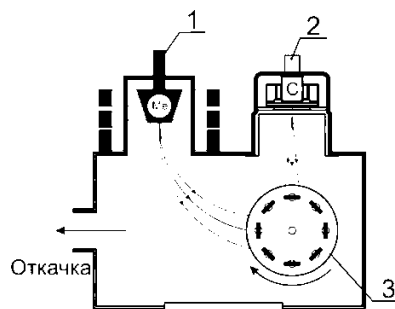


Рис. 1. Схема формирования многослойных метал-углеродных покрытий: 1 — дуговой испаритель постоянного тока с катодом из металла (ток дуги 60 А для катода из Al, ток дуги 70 А для катода из Ti, ток дуги 100 А для катода из Zr); 2 — источник импульсной углеродной плазмы (Частота следования импульсов от 5 до 15 Гц, напряжение разряда 350 В); 3 — технологическая оснастка

Результаты и их обсуждение. Разработана методика формирования покрытий, содержащих слои металлов (Zr, Al, Ti) толщиной 20—50 нм из потоков металлической плазмы и слоев аморфного углерода (толщиной 20—30 нм) из импульсной углеродной плазмы, с последующим отжигом при различных температурах полученных слоистых систем (рис. 2).

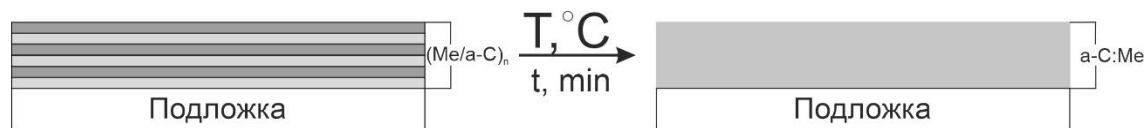


Рис. 2. Термообработка nano размерных металл-углеродных покрытий

Результаты исследования покрытий методом сканирующей электронной микроскопии показали, что термообработка слоистых систем, содержащих до 14 слоев (в данном случае в качестве металлической компоненты покрытия использовали слои титана) приводит к усилению межслойной диффузии, перестройке слоистой структуры покрытий. На рис. 3 приведено изображение скола многослойного Ti/a-C покрытия до и после термообработки. Установлено, что после отжига при 400 °C происходит растворение границ между слоями металл и углерода с образованием композиционной структуры, состоящей из металлических, углеродных и карбидных фаз (рис. 3).

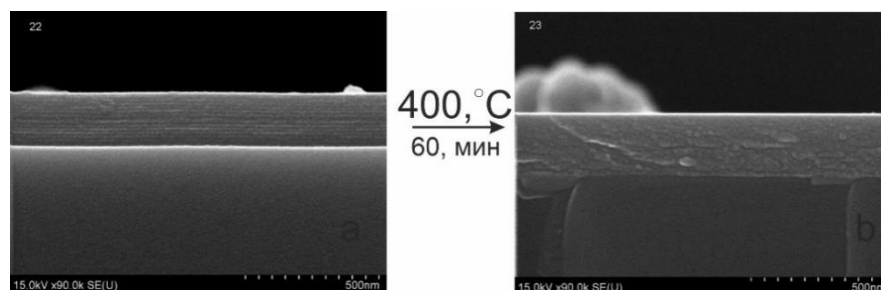


Рис. 3. СЭМ изображение скола металл/углеродных покрытий до(а) и после (б) проведения термообработки

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния установлены особенности изменения структуры (Ti/a-C) покрытий при различных температурах термообработки. Установлена зависимость параметров КР спектров (отношения ID/IG, положения и ширины G пика) от температуры отжига.

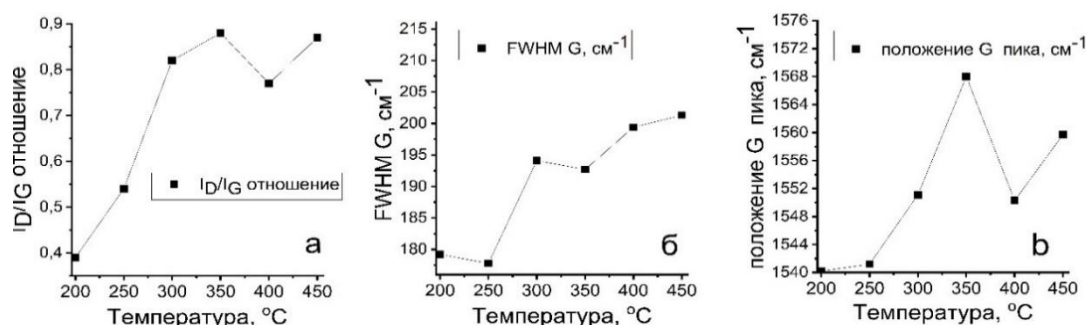


Рис. 4. Параметры КР спектров металл/углеродных покрытий после проведения термообработки

Анализ данных (рис. 4) показал, что с ростом температуры отжига происходит не только графитизация покрытия, но и образование карбидных соединений [1, 3].

Заключение. Осаждены многослойные титан-углеродные покрытия. Показано что термообработка позволяет изменить архитектуру покрытий от многослойных к композиционным за счёт усиления процессов межслойной диффузии.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» задание 4.1.6)

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / Д.Г. Пилипцов, А.С. Руденков, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Цзян Сяо Хун, Чжоу Бин; под ред. А.В.Рогачева – М.: Радиотехника, 2020. – 283 с.
2. Влияние природы подложки и термообработки алмазоподобных покрытий на их триботехнические свойства / А.В. Рогачев [и др.] // Трение и износ. – 2005. – Т.26 (2). – С. 182–186.

3. The Structure and Properties of a-C:Ti and a-C:Ti:N Coat-ings Deposited on a Titanium and Titanium Nitride Sublayer.
X. Jiang., D. Pilipstou, A. Rogachev, E. Kulesh, Y. Liu // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – P. 373–382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОТОЧНЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Е.М. Тихон

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь;
e.tikhon@psu.by

Введение. При изготовлении и сборке резьбовых соединений, используемых в расточных режущих инструментах, необходимо учитывать возникающие под действием сил и температуры остаточные напряжения, влияющие на надежность режущего инструмента [1].

Результаты и их обсуждение. Было проведено моделирование влияния температуры (рис. 1, а) и осевой силы на остаточные напряжения в резьбе (рис. 1, б) с использованием программного продукта «ANSYS».

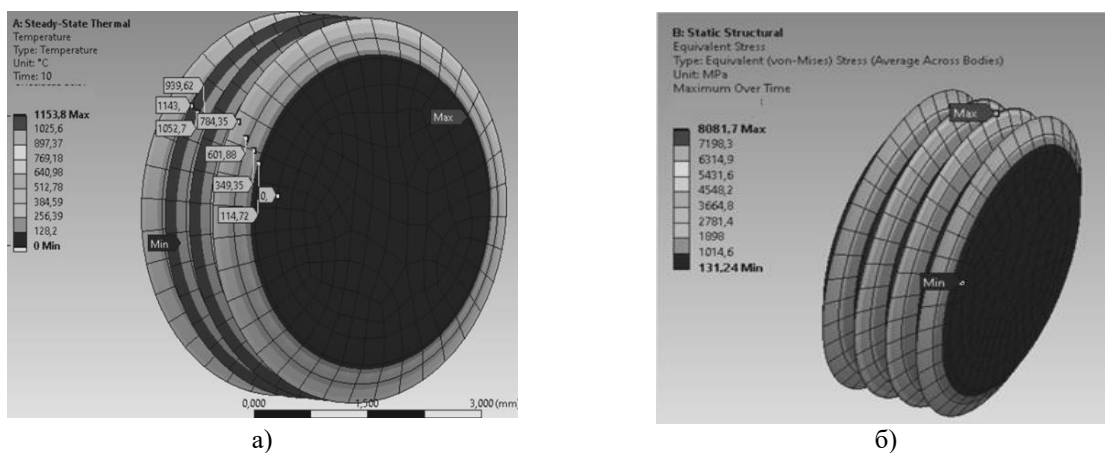


Рис. 1. Карты распределения температуры (а) и напряжений (б) в резьбе

Проведен анализ получаемых значений температуры и напряжений на вершинах, впадинах и контактных поверхностях рельефа при обработке резанием. Значения температур и напряжений на контактной поверхности резьбы при нагревании потоком теплоты (q) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Температура и напряжения на контактной поверхности
резьбы при нагревании потоком теплоты

q, Вт	50	100	200	300	400	500
T, °C	238	277	354	430	507	585
σ, МПа	100	199	398	597	797	996

Заключение. Установлены зоны максимальных значений температуры и напряжений, которые приводят к деформационным процессам на контактных поверхностях и снижению прочности материала на подложке. Предел прочности материала составляет 830 МПа, который достигается при нагревании контактной поверхности резьбы до температуры равной 450 °C.

1. Попок Н.Н. Теория резания: Конспект лекций для студ. машиностроительных спец. Ч. 2. Тепловые явления, изнашивание режущего инструмента, качество обрабатываемой поверхности, комбинированные виды обработки, оптимизация функционирования системы резания. – Новополоцк: ПГУ. – 2005. – 116 с.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК NiFe НА МАГНИТОИМПЕДАНСНЫЙ ЭФФЕКТ

В.А. Федькин, Т.И. Зубарь, А.Н. Котельникова, М.И. Панасюк,
О.Д. Канафьев, Т.И. Усович, А.В. Труханов

ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск; Беларусь; Fedkin-v@mail.ru

Введение. Сплавы NiFe обладают весьма ценными, уникальными магнитными и физическими свойствами. Такие факторы, как методика синтеза и его условия оказывают определяющее влияние на химический состав и структуру сплава, которые непосредственно коррелируют с его физическими характеристиками. Чередование катодных и анодных импульсов тока позволяет управлять, как химическим составом, так и зеренной структурой сплава NiFe. Режим синтеза напрямую влияет на микроструктуру и кристаллическую структуру поверхности.

Материалы и методы. Пленки Fe-Ni синтезированы методом электрохимического осаждения из сложного электролита, при импульс-реверсном (RC). режиме тока.

Образцы PR5, PR10, PR15, PR25 осаждались в импульс-реверсном режиме с плотностью тока 25 мА/см², с длительностью прямого импульса 0,1 с, длительность обратного импульса 5, 10, 15, 25 мс соответственно. Эффективное время осаждения всех образцов составляет 60 мин.

Исследования структуры полученных пленок проводились методом атомно-силовой микроскопии при нормальных условиях в статическом режиме на микроскопе NT-206 и сканирующем электронном микроскопе Zeiss EVO 10.

Результаты и их обсуждение. Коэффициент магнитоимпеданса (MI) определяется соотношением изменения комплексного электрического сопротивления в магнитном поле к комплексному сопротивлению при нулевом внешнем поле и определяется формулой [1, 2]:

$$MI = Z(B) - Z_0 / Z_0, \quad (1)$$

где $Z(B)$ — сопротивление в зависимости от приложенного поля; Z_0 — сопротивление при нулевом внешнем поле.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента магнитоимпеданса от приложенного значения частоты протекающего тока.

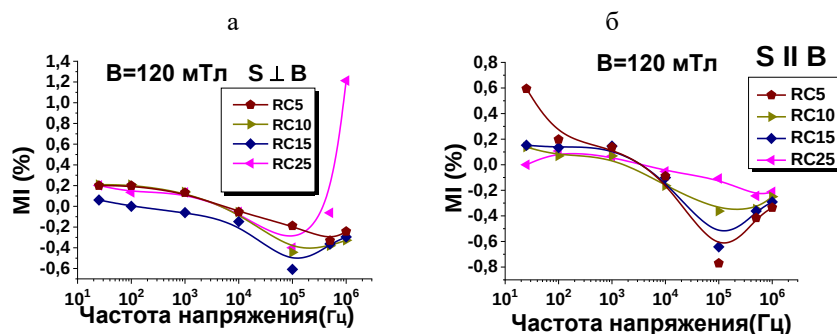


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента магнитоимпеданса от частоты напряжения. а — вектор магнитной индукции перпендикулярен току; б — вектор магнитной индукции параллелен току

При различных частотах магнитоимпеданс имеет разную природу. Теоретически можно выделить 3 области: Диапазон низких частот (до 10 кГц), диапазон средних частот (10 кГц — 10 МГц) и диапазон высоких частот (выше 10 МГц).

В данной работе, как видно из графиков, изображенных на рис. 1, исследования проводились в диапазоне низких и средних частот. В каждом диапазоне изменение магнитоимпеданса объясняется разными физическими моделями. В диапазоне низких частот (до 10 кГц) изменение импеданса, обусловлено изменением индуктивности L , которая, в свою очередь пропорциональна магнитной проницаемости [3, 4].

На рис. 1, а представлена зависимость коэффициента магнитоимпеданса при перпендикулярной ориентации вектора магнитной индукции относительно протекающего тока. При данной ориентации наблюдается заметный рост полного электрического сопротивления образца RC25. Увеличение коэффициента магнитоимпеданса объясняется влиянием анизотропии свойств при приложении магнитного поля к пленке с самым маленьким размером зерна. Чем более явно выражена структура зерна, тем меньше проявляется магнитоимпедансный эффект. Объясняется это незначительной перестройкой доменной структуры пленки при изменении направления магнитного поля относительно протекающего по ней тока.

На рис. 1, б представлена зависимость коэффициента магнитоимпеданса при параллельной ориентации вектора магнитной индукции относительно протекающего тока. При такой ориентации в образцах наблюдается минимальный коэффициент магнитоимпеданса.

1. Knobel M., Vázquez M., Kraus L. Giant magnetoimpedance // Handbook of magnetic materials. – 2003. – Т. 15. – С. 497–563.
2. Phan M. H., Peng H. X. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications // Progress in Materials Science. – 2008. – Т. 53. – №. 2. – С. 323–420.
3. Knobel M., Pirota K. R. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2002. – Т. 242. – С. 33–40.
4. Zhukov A., Ipatov M., Zhukova V. Advances in giant magnetoimpedance of materials // Handbook of Magnetic Materials. – Elsevier, 2015. – Т. 24. – С. 139–236.

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ И СПИН-ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС В ТОНКОМ ФЕРРОМАГНИТНОМ СЛОЕ

А.О. Шаплов

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь; yoichi@list.ru

Введение. Если на ферромагнетик, находящийся под воздействием сильного внешнего магнитного поля, падает электромагнитное излучение микроволнового диапазона, то при определённой частоте происходит т.н. резонансное поглощение. Это явление аналогично хорошо изученному ядерному магнитному резонансу и получило название *ферромагнитного резонанса* (ФМР). Для ФМР характерны микроволновой диапазон частот, очень узкие пики поглощения и сильная зависимость от формы образца.

В особых случаях (например, в случаях очень тонких ферромагнитных плёнок) возможно образование стоячих спиновых волн большой длины. Это приводит к тому, что часть энергии поглощаемого в ходе «обычного» ФМР излучения расходуется на генерацию таких волн. В результате происходит смещение пика поглощения в сторону увеличения частоты по сравнению с «чистым» ФМР и расщепление его на несколько пиков. Это явление получило название спин-волнового резонанса (СВР).

Материалы и методы исследования. Рассматривались тонкие однородные плёнки, пластины и слои ферромагнитного материала с произвольно направленной одноосной магнитной анизотропией на предмет возникновения ФМР. На основе феноменологической теории Ландау-Лифшица [1] для ферромагнетика мы получаем дисперсионные уравнения для резонансной частоты. На основе теории спиновых волн и магнонов была получена частота стоячих спиновых волн [2] в тонких ферромагнитных плёнках и слоях, которая добавляется к частоте ФМР из дисперсионных уравнений, полученных ранее, в результате чего мы получаем ожидаемый набор частот поглощения при СВР.

Результаты и их обсуждение. Полученные нами дисперсионные уравнения для ФМР позволяют решить обратную задачу, а именно по наблюдаемому ферромагнитному резонансу получить магнитные характеристики материала слоя. Так, мы обнаружили, что ФМР за исключением нескольких частных случаев наблюдается лишь в одной выделенной плоскости. Нами был обозначен важный частный случай, а именно когда вектор нормали к поверхности, ось магнитной анизотропии и вектор магнитного поля лежат в одной плоскости. В этом случае обозначенная плоскость строго перпендикулярна плоскости наблюдения ферромагнитного резонанса, а дисперсионные уравнения принимают вид

$$\omega^2 - p_2 x^2 - p_1 x - p_0 = 0, \quad x \equiv \cos 2\phi_k, \quad (1)$$

где ϕ_k — угол между нормалью к поверхности и волновым вектором возбуждаемых спиновых волн (который совпадает с углом распространения микроволнового излучения в плёнке после преломления), а коэффициенты p_0 , p_1 и p_2 зависят от коэффициента магнитной анизотропии β , гиромагнитного отношения γ , диссипативного параметра α и направлений оси магнитной анизотропии и магнитного поля (которые выражаются через углы к нормали к поверхности).

Уравнение (1) в рамках обратной задачи может быть использовано в методе наименьших квадратов для линейной функции нескольких переменных, в результате чего мы получим численные значения коэффициентов, а из коэффициентов — магнитные характеристики материала. Как показывает практика, для точного определения всех магнитных характеристик необходимо несколько серий измерений при разных направлениях магнитного поля по отношению к направлению магнитной анизотропии и нормали к поверхности. Также мы получили дисперсионные уравнения более частных случаев конкретных направлений векторов магнитного поля и оси магнитной анизотропии, которые позволяют упростить обратную задачу в случае, если направление магнитной анизотропии заранее известно.

Для СВР мы получили добавочную частоту

$$\omega_S = D \left(\frac{n}{\pi L} \right)^2, \quad (2)$$

где D — постоянная для спиновой волны в одномерном случае, n — число полуволн, укладывающихся в толщину ферромагнитного слоя L .

Добавочная частота СВР ω_S (2) добавляется к частоте «чистого» ФМР (1), при этом будет наблюдаться расщепление пика резонансного поглощения на несколько пиков в прямой зависимости от квадрата n . Обратная задача позволяет по расстоянию между пиками определить толщину ферромагнитного слоя и постоянную D .

Заключение. Решение обратной задачи ФМР и СВР позволяет найти магнитные характеристики и толщину ферромагнитного слоя без разрушения образца даже в условиях, когда другие методы недоступны (например, когда слой ферромагнетика лежит между слоями неферромагнитных материалов). Это позволяет использовать ФМР и СВР в неразрушающем контроле и для специализированных измерительных приборов.

1. Landau L.D., Lifshitz E.M., Phys. Zs. der Sowjetunion **8**, 153 (1935).
2. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела / Ч. Киттель. — М.: МедиаСтар, 2006.

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЫЖ

Е.И. Гапанькова, И.А. Латышевич

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

В последние годы увлечение лыжным спортом среди населения нашей страны набирает обороты. Лыжи постоянно совершенствуются и сейчас на смену деревянным лыжам пришли лыжи из пластика и комбинированные — из пластика и дерева. Для их изготовления сегодня используют не только пластик, но и композитные материалы, сплавы, древесину разных пород. Производство лыж налажено на филиале «Телеханы», в настоящее время остро стал вопрос перехода на отечественные составляющие в производственном процессе.

Работа выполнена в рамках проводимых совместных мероприятий НАН Беларуси, концерна «Белнефтехим» и ГП «Беларусьторг» по проведению контрольных испытаний препрегов, разработанных ИФОХ НАН Беларуси.

Цель работы — изучение механических свойств пластиковых лыж, изготовленных с применением опытных препрегов различной «живучести». В качестве опытных препрегов применяли препрег-ленты и препрег-флис, изготовленные в ИФОХ НАН Беларуси с помощью лабораторной пропиточной установки путем пропитки армирующего наполнителя разработанными термореактивными эпоксидными связующими [1].

Материалы и методы. Контроль эксплуатационных показателей пластиковых экспериментальных лыж не означает контроль и исследование всех параметров. Он включал в себя определение следующих показателей: масса лыжи [1]; стрела прогиба лыжи; положение центра тяжести лыжи [2]; жесткость и прочность при изгибе [3]; остаточный прогиб [4]; жесткость передней и задней частей лыжи [4]; усталость при циклическом нагружении [4].

Результаты и их обсуждение. Сотрудниками ИФОХ НАН Беларуси и БГТУ своевременно проводились испытания по определению основных эксплуатационных характеристик экспериментальных лыж, изготовленных с использованием опытных препрегов. Всего изготовлено всего 72 шт. с равными партиями с использованием наработанных препрегов и имеющих различный период хранения: 40 дн., 65 дн. и 90 дн. Все экспериментальные лыжи имеют один типоразмер — длина лыжной заготовки 1800 мм. Для слоя скольжения использована экструдированная полоса на основе термопластичных полимеров, изготовленная по ТУ ВУ 400084698.316-2019 «Слой скольжения лыж» в ИММС НАН Беларуси. В качестве декоративного слоя использовали пленку на основе термопластичных полимеров (Германия).

Завышенные значения показателя «Масса лыжи» (не более 725 г) для 17 образцов лыж объясняются прежде всего высокой массой среднего клина. Завышенные значения показателя «Стрела прогиба» (не более 30 мм) чаще всего характерны для образцов экспериментальных лыж, склеенных в пресс-формах, имеющих условное обозначение 2 и 2', что обусловлено особенностями геометрии самой формы. Зная конструктивные особенности формирования лыжного пакета, данный показатель может быть скорректирован. Отклонение от нормативных значений показателя «Остаточный прогиб» (0,6—1,7 мм) характерно для части лыжных заготовок, склеенных на втором этаже пресса (исключение 2 шт. лыжи, склеенные на первом этаже). На данный показатель, как и на показатель «Индекс жесткости FA» оказывает влияние применяемые на данной прессе

стальные пластины, уложенные на среднюю часть профилированных плит пресса каждого этажа. Также для лыж, полученных из лыжных заготовок, склеенных на втором этаже, характерны более высокие значения показателя «Индекс жесткости FA». Значение показателя «Разрушающая нагрузка» для всех лыж превышает нормативное значение (не менее 2060 Н), за исключением двух лыж, которые имеют значения ниже, но близкие к нормативному. Значения разрушающей нагрузки средней части лыж напрямую зависят от расположения шиповых соединений древесной части среднего клина. Ниже представлены виды и характер разрушений.



Разрыв в зоне шипового соединения и расслоение древесины



Разрыв в зоне шипового соединения, расслоение древесины и смятие под индентором



Смятие по шиповому соединению



Разрыв и смятие в шиповом соединении



Расслоение древесины и смятие под индентором



Разрыв в шиповом соединении, расслоение древесины

Рис. 1. Характерные виды разрушений при нагружении средней части лыж

Результаты испытаний по определению показателя усталости при циклическом нагружении подтвердили, что отслоений от препрег-флиса декоративного слоя и древесины среднего клина нет. Все лыжи имеют показатель усталости согласно нормативному значению (не более 60 %). Жесткость задней части и жесткость передней части лыж завышена для большинства экспериментальных лыж, что связано и с применяемой технологией на филиале «Телеханы» — на носочную и пяточную части (для укрепления) укладываются конечные отрезки препрег-ленты длиной 300 и 250 мм соответственно.

Основываясь исключительно на результатах проведенного комплекса испытаний и исследований образцов лыж в БГТУ, разработанные в ИФОХ НАН Беларуси препреги не зависимо от срока хранения при соблюдении условий их хранения позволяют обеспечивать требуемые показатели качества лыж на уровне образцов, изготовленных с применением импортных препрегов.

1. Латышевич И.А., Гапанькова Е.И., Полховский А.В., Бильдюкевич А.В., Шетько С.В., Прохорчик С.А., Клюев А.Ю., Козлов Н.Г. Полимерный композиционный материал на основе терпеноидного сырья для производства пластиковых лыж // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2020, вып. 233, 208–220.
2. Лыжи. Определение массы и положения центра тяжести : ГОСТ 30199-94. – Введ. 01.01.1994. – М.: Госстандарт России, 1994. – 7 с.
3. Лыжи. Технические условия : ГОСТ 17043-90. – Введ. 01.01.1991. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 21 с.
4. Лыжи спортивно-беговые. Методы испытаний : ГОСТ 30045-93. – Введ. 01.01.1995. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 12 с.

Для заметок

Для заметок

Для заметок

Научное издание

VII Республиканская научно-техническая
конференция молодых ученых,

**НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

18–20 октября 2022 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

*Ответственные за выпуск: И.Н. Ковалева, В.В. Терехов
Составитель: В.Ю. Шумская, Ф.А. Григорьев, В.Н. Усова, В.К. Меринов*

Подписано в печать 17.10.22. Формат издания 60x84^{1/8}.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 9,75. Тираж 100 экз. Заказ № 11-22

Государственное научное учреждение
«Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»
Регистрация № 1/244 от 25.03.14
246050 г. Гомель, Беларусь, Кирова, 32а

В сборнике представлены тезисы докладов участников VII 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@mail.ru <http://mpri.org.by>